



Л.В. ТАРАСОВ

ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ К ВЕРОЯТНОСТНЫМ



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ
2004

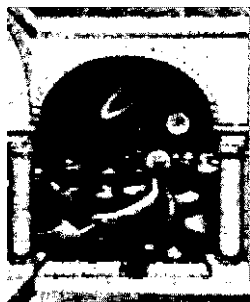
УДК 530.1
ББК 22.3
Т 19

Тарасов Л. В. Закономерности окружающего мира. В 3 кн. Кн. 3. Эволюция естественно-научного знания. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 360 с. — ISBN 5-9221-0529-9.

Данная книга завершает трехтомник автора с общим названием «Закономерности окружающего мира» (первая книга: «Случайность, необходимость, вероятность», вторая книга: «Вероятность в современном обществе», третья книга: «Эволюция естественно-научного знания»). Здесь в популярной и систематизированной форме анализируется эволюция естественнонаучных картин мира: от научных программ античности к механической картине, затем к электромагнитной картине и, наконец, к современной картине. Демонстрируется переход от динамических (жестко детерминированных) закономерностей к статистическим (вероятностным) закономерностям по мере постепенно углубляющегося научного постижения человеком окружающего мира. Достаточно подробно рассматривается эволюция представлений квантовой физики, физики элементарных частиц, космологии. В заключение обсуждаются идеи самоорганизации открытых неравновесных систем (возникновение диссипативных структур).

Для широкого круга читателей и в первую очередь для школьников старших классов (начиная с 9-го класса), а также для студентов техникумов и высших учебных заведений.

Л.В. ТАРАСОВ



ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
К ВЕРОЯТНОСТНЫМ



КНИГА ТРЕТЬЯ



ОГЛАВЛЕНИЕ

Вступительный диалог: главный урок историй естествознания	10

ТЕМА 1. ТРИ НАУЧНЫХ ПРОГРАММЫ АНТИЧНОСТИ		14
1.1	Четыре первоначала: огонь, воздух, вода, земля	15
1.2	Математическая программа Пифагора–Платона	17
1.3	Континуалистская физическая программа Анаксагора–Аристотеля	20
1.4	Атомистическая физическая программа Демокрита–Эпикура	23
1.5	Поэма Лукреция «О природе вещей»	25
1.6	Беседа, посвященная диалектическому мышлению	31

ТЕМА 2. ЭВОЛЮЦИЯ КОСМОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ, ПОТРЕБОВАВШАЯ ДВА ТЫСЯЧЕЛЕТИЯ (ОТ ФИЛОЛАЯ И АРИСТОТЕЛЯ К КОПЕРНИКУ И БРУНО)		36
2.1	Космологические представления пифагорейцев и платоников	36
2.2	Геоцентрическая система мира по Аристотелю	38
2.3	«Божественная комедия» Данте как этическая конструкция геоцентрической системы мира по Аристотелю	42
2.4	Античная наука между Божественным промыслом и случайностью	45
2.5	Геоцентрическая система мира по Птолемею	49
2.6	Гелиоцентрическая система мира по Копернику	51
2.7	Есть ли у Вселенной центр?	55

ТЕМА 3. СЕМНАДЦАТОЕ И ВОСЕМНАДЦАТОЕ СТОЛЕТИЯ: ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ МИРА		57
3.1	Становление классической механики	57
3.2	Мир Декарта и мир Ньютона	61
3.3	Атомисты XVII–XVIII столетий	63
3.4	Мир как сложный и точный часовой механизм. Философия деизма	65
3.5	Жесткий детерминизм или вероятность? (Размышления о Лапласе)	69
3.6	Основные черты механической картины мира	73

ТЕМА 4. ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАРТИНЫ МИРА В ДЕВЯТНАДЦАТОМ СТОЛЕТИИ: ОТ ФЛОИДОВ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ПОЛЮ		76
4.1	Начало века: изобилие фактов и домыслов	77
4.2	Раскол между философией и естествознанием	79

4.3	Механическая модель светоносного эфира; кризис этой модели	83
4.4	Концепции близкодействия и действия на расстоянии	87
4.5	Рождение и начальный этап становления электродинамики	90
4.6	Великое объединение XIX столетия (электродинамика как теория близкодействия)	98
4.7	Беседа о магнитосфере Земли, солнечном ветре и полярных сияниях	105

**ТЕМА 5. ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАРТИНЫ МИРА
В ДЕВЯТНАДЦАТОМ СТОЛЕТИИ: ОТКРЫТИЕ ОБЩИХ ПРИНЦИПОВ
И ДОСТИЖЕНИЯ АТОМИСТИКИ**

5.1	Беседа, посвященная двум общим принципам — принципу сохранения энергии и принципу возрастания энтропии	112
5.2	Термодинамика и закон сохранения и превращения энергии	116
5.3	Молекулярное строение вещества и молекулярно-кинетическая теория газов	120
5.4	Есть ли у атома внутренняя структура и какова она?	122
5.5	Электромагнитная картина мира	131
5.6	Беседа о привычке видеть за вероятностями однозначные закономерности, а также о нежелании разглядеть вероятность в необратимых процессах	136

ТЕМА 6. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

6.1	Проблема мирового эфира	144
6.2	Два постулата специальной теории относительности и преобразования Лоренца; новая концепция пространства и времени	148
6.3	Относительность одновременности событий, промежутков времени и расстояний	152
6.4	Электричество, магнетизм и принцип относительности	154
6.5	Связь между массой и энергией	155
6.6	Преобразования Лоренца как поворот осей в четырехмерном континууме	159
6.7	Принципиальные замечания по поводу общей теории относительности	161

**ТЕМА 7. НЕ ЗАМЕЧЕННОЕ СОВРЕМЕННИКАМИ ПОЯВЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ
В БИОЛОГИИ: РОЖДЕНИЕ ГЕНЕТИКИ**

7.1	От Ламарка к Дарвину	170
7.2	Опыты Грегора Менделя; открытие генетики	172
7.3	Хромосомы, гены, аллели	177
7.4	Случайное комбинирование генов при скрещивании	179

7.5	Сцепленное наследование и явление перекреста хромосом	183
7.6	Статистический характер законов классической генетики	186
ТЕМА 8. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА: РОЖДЕНИЕ И СТАНОВЛЕНИЕ		189
8.1	Беседа о том, что следует понимать под квантовой физикой	190
8.2	Зарождение квантовой физики	193
8.3	Теория атома водорода по Бору	198
8.4	Взаимодействие атомов с излучением по Эйнштейну	202
8.5	Загадочные дебройлевские «волны материи» и корпускулярно-волновой дуализм	205
8.6	Соотношения неопределенностей Гейзенберга	210
8.7	От «волн материи» к «волнам вероятности»	215
8.8	Некоторые следствия из соотношений неопределенностей	218
8.9	Что такое микрообъект? Можно ли его наглядно представить?	222
8.10	Реминисценция: Гете против Ньютона	229
ТЕМА 9. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА: НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ		232
9.1	Микрообъект в интерферометре	232
9.2	Различные и неразличимые альтернативы; сложение вероятностей и сложение амплитуд вероятностей	236
9.3	Обсуждение поведения электрона в двухщелевом интерферометре	238
9.4	Волновая функция как амплитуда вероятности	242
9.5	Суперпозиция состояний и потенциальные возможности микрообъекта	244
9.6	Реализация потенциальных возможностей микрообъекта в измерительном акте	246
9.7	Специфика квантовомеханического измерительного процесса; диалектика возможного и действительного	249
9.8	Фотоны, поляризаторы и суперпозиция состояний	251
9.9	Те ли это волны? Или: Всегда ли интерференция связана с волнами?	254
9.10	Квантовая механика как качественный скачок в процессе научного познания мира	259
ТЕМА 10. ТРАНЗИСТОР, ЛАЗЕР, АТОМНЫЙ РЕАКТОР И... ВЕРОЯТНОСТЬ		268
10.1	Электрон внутри кристалла	268
10.2	Металлы и неметаллы. Диэлектрики и полупроводники	275
10.3	Электронно-дырочный переход	277
10.4	Транзистор	279

10.5	Может ли свет усиливаться, проходя через вещество?	280
10.6	Физика лазера	281
10.7	Почему деление тяжелых атомных ядер может служить источником энергии?	286
10.8	Атомный реактор	288

ТЕМА 11. ПОИСКИ ПЕРВОНАЧАЛ МАТЕРИИ: ДОКВАРКОВЫЙ ПЕРИОД	292

11.1	Открытие нейтрона. Протонно-нейтронная модель атомного ядра	292
11.2	Нестабильность нейтрона и предсказание существования нейтрино	296
11.3	Прямое подтверждение существования нейтрино	299
11.4	В предвидении антимира. Открытие позитрона	301
11.5	От теории Дирака к квантовой теории поля	304
11.6	Диаграммы Фейнмана	308
11.7	Фундаментальные взаимодействия	312
11.8	Пионы как переносчики сильного взаимодействия, связывающего нуклоны в атомных ядрах	320
11.9	Странные частицы	326
11.10	«Долгоживущие» элементарные частицы, открытые до 1965 года	329

ТЕМА 12. ПОИСКИ ПЕРВОНАЧАЛ МАТЕРИИ: КВАРКОВАЯ МОДЕЛЬ АДРОНОВ	334

12.1	Открытие кварковой структуры адронов	334
12.2	Появление у кварков «цвета»	339
12.3	Глюоны как переносчики сильного взаимодействия. Рождение квантовой хромодинамики	340
12.4	Открытие «очарованных частиц» и «прелестных частиц»	344
12.5	Кварк-лептонная симметрия; три поколения фундаментальных фермионов	346
12.6	Три этапа в познании строения вещества — три спектроскопии	349

ТЕМА 13. ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ КАРТИНЫ МИРА	353

13.1	Что такое элементарная частица?	354
13.2	Вещество и поле	357
13.3	Мир взаимопревращений	359
13.4	Мир законов сохранения, ограничивающих взаимопревращения	363
13.5	Мир, построенный на вероятности	365
13.6	Физический вакуум в современной картине мира	369
13.7	Общие замечания о современной картине мира	370
13.8	Смена естественнонаучной традиции	372

ТЕМА 14: СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВСЕЛЕННОЙ: РОЖДЕНИЕ И СМЕРТЬ		378
14.1	Звездное небо	379
14.2	Рождение звезды	382
14.3	Жизнь звезды	384
14.4	Завершение жизни звезды	387
14.5	Нейтронные звезды (пульсары)	392
14.6	Черные дыры — самые удивительные космические объекты	393
ТЕМА 15. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВСЕЛЕННОЙ: ОТКРЫТИЯ И ПРОБЛЕМЫ КОСМОЛОГИ		397
15.1	Расширение Вселенной	398
15.2	Большой Взрыв	401
15.3	Открытие реликтового излучения	404
15.4	Основные этапы эволюции расширяющейся Вселенной, начиная с первой десятимиллиардной доли секунды	405
15.5	Крупномасштабная структура Вселенной, или: Иерархическая лестница структур Вселенной	414
15.6	Почему началось расширение Вселенной?	416
ТЕМА 16 (заключительная беседа). ПРОБЛЕМА САМООРГАНИЗАЦИИ МАТЕРИИ КАК ВОДОРАЗДЕЛ МЕЖДУ НАУЧНЫМ И РЕЛИГИОЗНЫМ ПОДХОДАМИ К ПОСТИЖЕНИЮ ОКРУЖАЮЩЕГО МИРА		421
16.1	Ключевая проблема — самоорганизация, или, иначе говоря, синергетика	422
16.2	Самоорганизация систем как феномен возникновения диссипативных структур	424
16.3	Примеры диссипативных структур	426
16.4	Два принципиально разных подхода к постижению мира: научный и религиозный	431
16.5	Правомерно ли рассматривать Большой Взрыв как Божественный акт?	433
16.6	О религиозном чувстве Эйнштейна	434
16.7	Так ли много печали во многих мудрости?	436
Список литературы		438



ВСТУПИТЕЛЬНЫЙ ДИАЛОГ: ГЛАВНЫЙ УРОК ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Я считаю, что наиболее важное значение для развития наших методов мышления молекулярные теории имеют по той причине, что заставляют делать различие между двумя типами познания, которые можно назвать динамическим и статистическим.

Джеймс Клерк Максвелл — 1859 год.

Для понимания сущности всякого явления природы важно провести тщательное и глубокое различие между двумя видами закономерности: динамической и статистической...

Макс Планк — 1914 год.

Динамические законы представляют собой первый, низший этап в процессе познания окружающего нас мира; статистические законы обеспечивают более совершенное отображение объективных связей в природе: они выражают следующий, более высокий этап познания.

Г.Я. Мякишев — 1972 год.

Читатель. Уроки истории... Они весьма часто игнорируются людьми.

Автор. К сожалению, это так. Впрочем, здесь речь пойдет не о той истории, которая описывает жизнь человеческого общества и интересуется, главным образом, военными конфликтами и политикой властвующих. Здесь имеется в виду *история естествознания*, история развития представлений человека о природе, история процесса познания человеком мира природы. Того мира, в котором человек живет и частью которого он сам является. Итак, каков же *главный урок* истории естествознания?

Читатель. По-моему, главный урок — это вывод о неисчерпаемости природы, о бесконечности процесса ее познания. Вспомним у *И.С. Тургенева* (1818–1883):

В моей душе тревожное волнение:
Напрасно вопрошал природу взором я;
Она молчит в глубоком усыплении —
И грустно стало мне, что ни одно творенье
Не в силах знать о тайнах бытия.

Этой мысли созвучна отрешенность, звучащая в стихах *Ф.И. Тютчева* (1803–1873):

Природа — сфинкс. И тем она верней
Своим искусом губит человека,
Что, может статься, никакой от века
Загадки нет и не было у ней.

Автор. Признание неисчерпаемости природы и невозможности ее познания — это лишь одна из точек зрения. Назовем ее условно пессимистической. Однако есть и оптимистическая точка зрения, согласно которой человек в ходе процесса познания все глубже и глубже постигает природу, обнаруживает в ней все больше и больше закономерностей и все шире и шире использует эти закономерности в своей практике. Как писал *Эмиль Верхарн* (1855–1916),

Пусть невозможного в стремительной погоне
Достичь ты хочешь, человек, —
Не бойся, что замедлят бег дерзанья золотые кони!
Что виделось вчера как цель глазам твоим, —
Для завтрашнего дня — оковы;
Мысль — только пища мыслей новых, но голод их неутолим.
Так поднимайся вверх! Ищи! Сражайся! Веруй!
Отринь все то, чего достиг:
Ведь никогда застывший миг не станет будущего мерой.

Читатель. Так в чем же заключается главный урок истории естествознания?

Автор. Он заключается в осознании того факта, что по мере выхода на более глубокие уровни познания природы необходимо все решительнее преодолевать ограниченность столь приятных неискушенному разуму *динамических закономерностей* (закономерностей, основанных на жестко детерминированных причинно-следственных связях) и обращаться к *закономерностям статистическим* (закономерностям, основанным на вероятностных связях).

Читатель. Но что означает «преодолевать ограниченность динамических закономерностей»? *Отказаться* от них? Объявить ошибочными все законы физики, сформулированные в минувшие столетия, когда ученые еще не начали интересоваться вероятностями?

Автор. Речь вовсе не идет об отказе от использования динамических закономерностей, сформулированных в рамках классической механики, термодинамики, электродинамики, теории относительности. Имеется в виду осознание того, что динамические закономерности должны рассматриваться как *некая идеализация* действительности. Они, конечно, отражают действительность, но отражают *приблизительно* в том смысле, что *не учитывают многие детали*.

Читатель. А может быть, как раз это и хорошо? Может быть, детали только мешают понять главное?

Автор. На соответствующем уровне познания природы какие-то детали в самом деле излишни, так что «идеализированные» динамические закономерности тут как раз к месту. Вполне возможно также, что многим людям совершенно достаточно такого уровня миропонимания. Но человечество в целом, конечно, стремится (и всегда будет стремиться) к тому, чтобы *познать природу все более и более глубоко* — без этого невозможен прогресс. И на данном пути ему (человечеству) придется все дальше и дальше отходить от идеализации и рассматривать все больше и больше деталей в картине природы. Все это можно понимать как процесс постепенного перехода (эволюции) от рассмотрения *частных* ситуаций, для которых вполне достаточно динамических закономерностей, к ситуациям *более общего характера* — когда уже не обойтись без исследования вероятностных закономерностей. Вот в этом и состоит главный урок истории естествознания.

Читатель. Как я понимаю, именно таков лейтмотив данной книги?

Автор. Совершенно верно. Познакомившись ранее с книгой «Вероятность в современном обществе», Вы могли убедиться, что вероятность (как и количество информации) является одним из *ключевых* научных понятий в современном обществе, насыщенном информационными технологиями. Обращаясь теперь к книге «От динамических закономерностей к вероятностным» (к завершающей книге трехтомника «Закономерности окружающего мира»), хотелось бы на основе анализа эволюции естественнонаучной картины мира от античности до наших дней показать принципиально важную (можно сказать, решающую) роль вероятности в *процессе научного познания мира*.

Читатель. Здесь будет рассматриваться история естествознания?

Автор. Я не преследовал цели рассмотреть последовательно и обстоятельно историю естествознания или хотя бы историю физики или биологии. Этому посвящены специальные книги. Я предполагаю, следуя в целом исторической канве, ограничиться лишь некоторыми «узловыми фрагментами», выбранными из истории естествознания. Выбор этих «фрагментов» и комментарии к ним должны будут, как надеется автор, способствовать более полному раскрытию идеи *постижения мира через вероятность*.



ТРИ НАУЧНЫХ ПРОГРАММЫ АНТИЧНОСТИ

Первообразы и первоначала не поддаются ясному изложению на словах, потому что их трудно уразуметь и трудно высказать. Оттого и приходится для ясности прибегать к числам.

Пифагор

...Существуют такие тела, что прочны и вечны.

Это — вещей семена и начала в учении нашем,

То, из чего получился весь мир, существующий ныне...

Первоначала вещей, таким образом, просты и плотны.

Иначе ведь не могли бы они, сохраняясь веками,

От бесконечных времен и досель восстанавливать вещи.

Лукреций

1.1 ЧЕТЫРЕ ПЕРВОНАЧАЛА: ОГОНЬ, ВОЗДУХ, ВОДА, ЗЕМЛЯ

Наука о природе зародилась в лоне древнегреческой философии две с половиной тысячи лет назад. В Древней Греции впервые в истории начали заниматься наукой не только ради решения практических задач, но и просто потому, что это интересно. Первые ученые стали называться *философами*, что в переводе с греческого означает «любители мудрости». Полагают, что первым, кто назвал свои рассуждения о смысле жизни и о природе философией («любомудрием») был *Пифагор из Самоса* (VI—V века до н.э.). Конечно, античная наука располагала крайне скудными данными; в те времена экспериментальные исследования фактически не проводились. В арсенале древнегреческих философов были лишь простые наблюдения над природой, гипотезы и логические рассуждения. Неудивительно, что их выводы нередко оказывались произвольными и просто ошибочными; многое в их научном наследии представляется нам сегодня наивным.

И тем не менее, как отмечал *Фридрих Энгельс* (1820—1895) в «Диалектике природы», «в многообразных формах греческой философии уже имеются в зародыше, в процессе возникновения, почти все позднейшие типы мировоззрений. Поэтому теоретическое естествознание, если оно хочет проследить историю возникновения и развития своих теперешних общих положений, вынуждено возвращаться к грекам». Этот экскурс в античную эпоху важен, в частности, и потому, что здесь мы обнаруживаем удивительное владение *диалектическим методом*. «Древнегреческие философы, — писал Энгельс, — были все прирожденными, стихийными диалектиками, и Аристотель, самая универсальная голова среди них, уже исследовал существеннейшие формы диалектического мышления».

В VI веке до н.э. в античной науке укрепилась идея о *материальной* первооснове всех вещей. По-видимому, первым стал рассуждать о природе *Фалес из Милета* (VII—VI века до н.э.). Он полагал, что первоосновой является вода: «Начало всего есть вода... Земля плавает на воде... Океан — всем прародитель». В историю науки Фалес вошел как математик, впервые прибегнувший к *геометрическим доказательствам*. Первые в истории математики теоремы были доказаны именно им. Например, теоремы о равенстве вертикальных углов, о равенстве углов при основании в равнобедренном треугольнике, о делении круга пополам с помощью диаметра. До сих пор в учебниках по геометрии рассматривается теорема, носящая имя Фалеса Милетского: «Если

параллельные прямые, пересекающие стороны угла, отсекают на одной стороне равные отрезки, то они отсекают равные отрезки и на другой стороне угла».

Анаксимен из Милета (VI век до н.э.) полагал, что первоосновой всего является *воздух*: «Дыхание и воздух объемлют весь космос; из них все возникает, и в них все разрешается... Воздух порождает все вещи путем сгущения... При разрежении воздух становится теплым, и из него получается огонь».

С Анаксименом связывают следующую поучительную легенду. «Скажи мне, — спросил Анаксимена один из его учеников, — почему тебя одолевают частые сомнения? Ты прожил долгую жизнь, умудрен опытом, учился у великих эллинов. Как же получается, что у тебя возникает гораздо больше вопросов, чем у меня?» В раздумье философ очертил посохом перед собой два круга: большой круг, а в нем малый круг. «Твои знания, — сказал он ученику, — это малый круг, а мои — большой. Неизвестность за пределами кругов. Чем шире круг, тем больше его граница с неизвестностью. И впредь, чем больше ты станешь узнавать нового, тем больше будет возникать у тебя неясных вопросов».

Гераклит из Эфеса (VI–V века до н.э.) полагал, что первоосновой всего является *огонь*: «Все из огня возникло и снова в огонь разрешится... Все обменивается на огонь, и огонь — на все». Гераклит утверждал: «Мир, единый из всего, не создан никем из богов и никем из людей, а был, есть и будет вечно живым огнем, закономерно воспламеняющимся и закономерно угасающим». В учении Гераклита важную роль играла идея вечного движения, всеобщей изменчивости вещей. *Все течет — все изменяется*. Невозможно войти дважды в одну и ту же реку — на входящего во второй раз будут набегать уже новые воды. Гераклит фактически достиг понимания *единства и борьбы противоположностей*; он считал, что противоположности, противоборствуя, в то же время не исключают одна другую, но образуют вместе «гармонию мира» («Расходящееся всегда сходится»). Энгельс писал: «Первоначальный, наивный, но по сути дела верный взгляд на мир был присущ древнегреческой философии и впервые ясно выражен Гераклитом: все существует и в то же время не существует, так как все течет, все постоянно изменяется, все находится в постоянном процессе возникновения и исчезновения».

Удивительный мыслитель *Эмпедокл из Агригента* (V век до н.э.), отказавшийся от царской власти в пользу занятий философией, утверждал, что существуют четыре первоначала (четыре «телесные стихии»): *огонь, воздух, вода, земля* — и две движущие силы: *Любовь* (сила притяжения) и *Вражда* (сила отталкивания). Эмпедокл высказал много достаточно любопытных мыслей: «Сущее и множественно, и едино... Еди-

ное должно иметь в себе противоположные качества... Природа сложных тел образуется из четырех неизменных элементов... Огонь, вода, земля и воздух произошли от природы и случая... Все одарено разумом; и не только животные, но и растения... По необходимости господствует над вещами и движет их то Любовь, то Вражда; в промежуточное же время царит покой... Первые животные и первые растения совсем не родились целыми, но отдельными частями, которые потом скрепились между собой... Все то, что соединилось друг с другом так, что было в состоянии сохраниться, стало животным и выжило вследствие взаимного восполнения того, что недоставало другому; все, что не сошлось по соответственному соотношению, погибло». Вот небольшой отрывок из поэмы Эмпедокла «О природе» в переводе с латинского Ф. Петровского:

Так Единство из Многости вечно родится,
А разделеньем Единства опять образуется Многость:
Огонь, и Вода, и Земля, и Воздух безмерно высокий...
Только они существуют все те же, но входят друг в друга
И возникают в обличья людей и различных животных.
То, Любовью влекомы, сойдутся в едином порядке.
То, Враждою раздора вновь гонятся врозь друг от друга...

1.2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА ПИФАГОРА—ПЛАТОНА

Рассматривая зарождение науки в античную эпоху, выделяют три научных программы: *математическую программу*, связываемую с именами Пифагора и Платона, и две физических (точнее, физико-философских) программы — *континуалистскую программу* Анаксагора—Аристотеля (от латинского «континуум», что означает «непрерывное») и *атомистическую программу* Демокрита—Эпикура.

С философской точки зрения математическая программа Пифагора—Платона являлась *идеалистической*, тогда как обе физические программы были по сути своей *материалистическими*.

Автор известной теоремы о равенстве квадрата гипотенузы сумме квадратов катетов прямоугольного треугольника *Пифагор из Самоса* (VI—V века до н.э.) утверждал: «Все есть число». Эту фразу можно нередко слышать и в наше время. Однако для нас она выражает ту мысль, что все (или почти все) может быть оценено *количественно*, т. е. с помощью чисел. А вот пифагорейцы понимали указанную фразу *в буквальном смысле*, полагая, что все сущее происходит от чисел, что в каждой вещи неким образом «скрыты» определенные числа и что «числа управляют

миром». Они уравнивают добро и зло в мире, обеспечивают в нем возрождение и определяют уничтожение, способствуют успеху, влияют на судьбу человека.

Единица символизировала единство мира и именно она рассматривалась как первопричина всего — ведь любое число (речь шла о натуральных числах) складывается из единиц. *Двойка* выражала противостояние двух противоположных начал (света и тьмы, добра и зла), поддерживая их во взаимном равновесии и не позволяя одному из них уничтожить другое. *Тройка* почиталась особым числом, обеспечивающим само существование мира, поскольку она символизировала триаду «начало — середина — конец» (а также «прошлое — настоящее — будущее»). *Четыре* — первое квадратное число, а все квадратные числа символизировали, по Пифагору, справедливость, поскольку являлись произведением двух равных множителей. Число *пять* — сумма первого «женского» (четного) числа и первого «мужского» (отличного от единицы нечетного) числа; поэтому число пять было у пифагорейцев символом бракосочетания, символом влюбленных. Позднее с числом пять стали связывать священный знак — *пентаграмму*, или, проще говоря, пятиконечную звезду. Прямая пентаграмма (наверху один конец звезды) означала совершенного человека, а обратная пентаграмма (наверху два конца звезды) — порочного человека. Число *шесть* пифагорейцы считали символом возрождения, полагая, что залогом возрождения является связь всего сущего с Богом. Шестиугольную звезду можно представить в виде двух треугольников, вставленных один в другой. Треугольник, обращенный одной из своих вершин вверх, символизирует устремление человека к Богу. А треугольник, опущенный одной из вершин вниз, символизирует божью благодать, которая снисходит на человека. Число *семь* почиталось особенно: оно считалось числом судьбы и тайны. К числу *восемь* (первому кубическому числу) пифагорейцы относились с некоторым страхом — ведь оно могло распадаться на две равные половины, каждая из которых, в свою очередь, могла распадаться на две равные половины и, наконец, те тоже делились пополам, в результате чего от восьмерки оставались только единицы. Поэтому восемь считалось символом уничтожения. Позднее это число стали рассматривать как символ неотвратимости и символ правосудия. Число *девять* было для пифагорейцев символом мужества, силы, энергичности, успеха — ведь это было первое квадратное «мужское» число.

Пифагорейцы ввели, в частности, понятие *дружественных* чисел. Они считали два числа дружественными, если сумма всех делителей (включая единицу) одного числа равна другому числу и, в свою очередь, сумма всех делителей второго числа равна первому числу. Вот пары дружественных чисел: 220 и 284, 17 296 и 18 416, 9 363 584 и 9 437 056.

Мистика чисел, пронизывающая все учение пифагорейцев, оказалась весьма живучей — она проникла в религиозные воззрения последующих столетий, проявилась в магии и астрологии и дожила, как это ни странно, до наших дней. В то же время надо признать, что подчеркивание важности числовых соотношений в природе способствовало

развитию методов количественного анализа, утверждало необходимость применения математики в научном описании природы. Играя с числами, пифагорейцы внесли немалый вклад в развитие арифметики (исследования в области четных и нечетных чисел, простых и составных чисел).

Платон из Афин (его подлинное имя Аристокл) (V–IV века до н.э.) — ученик и последователь Сократа, учитель Аристотеля, основатель знаменитой Академии, просуществовавшей более четырех веков, — полагал, что истинным «бытием» является *мир идей*, постигаемый человеком в процессе размышлений благодаря знаниям, которые «изначально скрыты в его душе». Идеи вечны и неизменны и главная из них — *идея блага*.

Что касается *вещей*, т. е. предметов окружающего мира, воспринимаемых органами чувств, то они являются, по Платону, всего лишь *теньями, отражениями соответствующих идей*. Суть процесса познания — это *припоминание* бессмертной души об идеях, которые она созерцала до соединения с телом, т. е. до рождения человека. Это была позиция *объективного идеализма*.

Платон написал более двадцати высокохудожественных *книг-диалогов*, в которых представил не только свою теорию идей и познания как припоминания идей, но также свои взгляды на этику, космологию, общество и политику. Все его труды проникнуты верой в силу и верховенство разума и заботой об исправлении человечества.

Яркой иллюстрацией философских взглядов Платона может служить знаменитый «Миф о пещере» из книги «Государство». Сидящие в темной пещере скованные узники полагают, что действительность — это те мимолетные тени, которые отбрасывает огонь, что горит за спинами узников. Одному из пленников удастся ускользнуть из мира тьмы и теней и выбраться из пещеры. Платон рассматривает этот побег как переход от невежества к знанию, переход из мира вещей в мир идей, переход из мира мимолетных теней в мир вечных, неизблемых истин, познаваемых разумом.

Вслед за Эмпедоклом Платон полагал, что основу мира вещей составляют четыре «стихии»: огонь, воздух, вода, земля. Он добавил к ним еще одну «стихию» — эфир. Каждая «стихия» состоит, по Платону, из мельчайших частичек, имеющих форму *правильных многогранников*. Частицы огня — тетраэдры, воздуха — октаэдры, воды — икосаэдры, земли — кубы, эфира — додекаэдры. Эти частички часто называют *платоновыми телами*. Мельчайшие частички Платона могут, очевидно, рассматриваться как атомы. Таким образом, математическая программа Платона пересекается с атомистической программой Демокрита–Эпикура.

1.3 КONTИНУАЛИСТСКАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА АНАКСАГОРА—АРИСТОТЕЛЯ.

Переходя к обсуждению физических программ античной науки, отметим прежде всего их наиболее важные черты. Континуалистская программа отрицала пустоту (вакуум) в природе, рассматривала материальный мир в виде *непрерывно заполняющей все пространство субстанции*, в которой совершаются круговые и иные движения. Предполагалось, что эта материальная субстанция *беспредельно делима*. Атомистическая программа, напротив, не признавала беспредельной делимости материи; она исходила из предположения, что материя состоит из невидимых глазу неделимых частичек — *атомов* (по-гречески «атом» означает «неделимый», а точнее, «нерассекаемый»). Атомисты полагали, что мир — это, в конечном счете, *пустота, в которой движутся атомы или их скопления*.

Основоположителем континуалистской научной программы является *Анаксагор из Клазомен* (первая половина V века до н.э.), провозгласивший: «Пустоты не существует вовсе!» Рассматривая структуру заполняющей пространство материи, Анаксагор исповедовал идею *гомеомерии* (от греческих «гомеос» — «подобный» и «мерос» — «части»). Он полагал, что в *любом* объекте содержатся мельчайшие частички *всех* вещей: «Во всем есть часть всего». Вот что писал Анаксагор:

Мы видим, что простейшая пища — вода и хлеб — превращается в волосы, в вены, в нервы, в кости и так далее. Следовательно, необходимо, чтобы в хлебе и воде содержались маленькие волосы, вены, нервы и так далее, которых наши чувства там не обнаруживают, но которые не остаются невидимыми для нашего рассудка. Каждая вещь характеризуется тем, что в ней преобладает. Так, золотом представляется нам то, в чем много золота, хотя в нем есть все... Ни одна вещь не возникает и не уничтожается, но каждая составляется из смешения существующих вещей или выделяется из них. Дождь идет потому, что он, в виде воды, уже есть в воздухе. Из камня выделяется огонь при высекании. Из воды выделяются при нагревании пузыри воздуха... Подобное увеличивается за счет подобного».

По Анаксагору, материя, заполняющая пространство, пребывает в глобальном вихревом движении; *мир в целом есть вращающийся вокруг Земли Космос*. Это круговращение началось когда-то в некоторой малой области пространства под действием некоего толчка (движущего начала, так называемого «Нуса»), а затем стало разрастаться, захватывая новые и новые области пространства, и одновременно постепенно замедляться. Анаксагор утверждал, что указанное круговращение прояв-

ляется в суточном вращении небосвода. Земля образовалась из сгущения материи в центре вращающегося Космоса. Будучи достаточно массивным телом, она сильнее замедлялась, и вот теперь она неподвижно пребывает в центре вращающегося вокруг нее и при этом продолжающего расширяться Космоса. Анаксагор был уверен, что развитие Космоса во времени происходит строго необходимо; как и все участники континуалистской программы, он полностью исключал случайность из картины мира.

Свое завершение континуалистская программа получила сто лет спустя в трудах *Аристотеля из Стагира* (IV век до н.э.) — одного из наиболее выдающихся умов античной эпохи, автора многих сочинений: «Физика», «О небе», «Метеорологика». «История животных», «Категории», «О душе», «Этика», «Поэтика», «Риторика», «Политика» и других.

Любопытная справка. Сочинение Аристотеля «Об умопостигаемых началах бытия», посвященное собственно философии, ныне приводят под названием «Метафизика». Однако во времена Аристотеля такого понятия просто не существовало. Его нечаянно «придумал» в I веке до н.э. хранитель Александрийской Библиотеки Андроник Родосский. Расставляя по полкам свитки рукописей Аристотеля, он поместил сначала те из них, которые были посвящены природе, а затем те, где рассматривались общие принципы. «После» по-гречески звучит как «мета». Рукопись о началах бытия была помещена после «Физики» и была помечена как «Метафизика». Сегодня под *метафизикой* понимают метод мышления, противоположный диалектике; он очерчивает крайними категориями и составляет основу *формальной логики*. Именно этот метод мышления рассматривался в той рукописи Аристотеля.

По Аристотелю, Космос ограничен, имеет форму сферы, в центре которой находится земной шар; за пределами этой сферы нет ничего — ни пространства, ни времени. В пределах же сферы нет пустоты — все заполняет «первичная материя». Космологические представления Аристотеля будут рассмотрены в § 2.2; здесь же мы ограничимся кратким обсуждением его взглядов, касающихся природы материи и движения тел.

Аристотель полагал, что под действием той или иной пары из четырех «первичных сил» (горячего, сухого, холодного, мокрого) первичная материя приобретает вид одной из четырех «стихий» (огня, воздуха, воды, земли). Так, от сочетания сухого и горячего получается огонь, сухого и холодного — земля, мокрого и холодного — вода, мокрого и горячего — воздух. «Стихии» могут переходить одна в другую и, кроме того, вступать в различные соединения друг с другом, образуя разнообразные «вещества»: металлы, песок, глину, мясо, кровь, древесину и т. д. Наконец, из веществ образуются всевозможные тела.

Аристотель различал *естественные* и *насильственные* движения тел. Для земных тел естественными являются движения по прямой к центру Космоса (т. е. вниз) или от центра Космоса (вверх); тяжелые тела по самой своей природе *стремятся* вниз, а легкие *стремятся* вверх. Всякие иные движения земных тел являются насильственными. Для небесных тел естественными движениями являются движения по окружностям вокруг центра Космоса, т. е. вокруг Земли. Причину естественных движений Аристотель усматривает в самой природе этих движений; причина насильственных движений — сила, действующая на тело. При этом *инерция во внимание не принималась* (понимания инерции в те времена еще не было): поэтому насильственное движение считалось возможным, лишь пока действует соответствующая сила. *Если действие силы прекратится, движение должно тотчас же прекратиться*. Прямолинейное равномерное скольжение льдышки по ровной горизонтальной поверхности льда является, по Аристотелю, насильственным движением и требует непрерывающегося внешнего воздействия. Почему летит выпущенная из лука стрела? Так как природа не терпит пустоты, рассуждал Аристотель, то в пространство позади стрелы немедленно устремляется воздух; он-то и подталкивает все время стрелу, заставляя ее перемещаться вперед.

Представления Аристотеля о естественных и насильственных движениях тел господствовали в науке в течение двух тысяч лет — вплоть до XVII века, когда возникла механика Галилея–Ньютона. В дальнейшем от этих представлений отказались как от ошибочных. Правда, их отголоски дожили до наших дней; и сегодня встречаются подчас в учебниках выражения типа «тело стремится придти в состояние с минимальной энергией», «электроны стремятся перейти на более низкие уровни». Это таинственное «стремление» неодушевленных объектов напоминает аристотелевское «стремление» тел совершать естественные движения.

Следует отметить, что именно Аристотель ввел термин «физика», что в переводе с греческого означает «учение о природе». Он сформулировал главную задачу науки — *поиск начал и причин*. «То, что мы ищем, — это начала и причины существующего, — писал Аристотель. — Учение о природе имеет дело с такой сущностью, которая имеет начало движения и покоя в самой себе. Это учение не о деятельности и не о творчестве». Тем самым Аристотель подчеркивал отличие физики («учения о природе») от политики («учения о деятельности») и поэтики («учения о творчестве»). В своих трудах Аристотель весьма часто ставит вопрос «почему?» Он считает, что именно на этот вопрос и должно давать ответы научное знание.

1.4 АТОМИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА ДЕМОКРИТА—ЭПИКУРА

Основателями атомистики в Древней Греции принято считать *Левкиппа* (V век до н.э.) и его знаменитого ученика *Демокрита из Абдеры* (V—IV века до н.э.). Согласно Левкиппу и Демокриту, в мире есть лишь два «начала» — пустота (небытие) и атомы (бытие). Пустота безгранична, в ней нет ни «верха», ни «низа». В этом бесконечном пространстве в различных направлениях носятся атомы. «Когда они приближаются друг к другу и зацепляются друг за друга, образуются тела». По Демокриту, атомы бесконечно разнообразны по форме, они имеют выпуклости, углубления и даже крючкообразные зацепки, позволяющие им надежнее сцепляться друг с другом. «Огонь образован шарообразными атомами, ибо шар всегда касается других поверхностей столь малым соприкосновением, что всегда соскальзывает; а огонь и есть бесконечно легкая подвижность». Демокрит полагал, что «ничто не происходит случайно, все совершается по закону и в силу необходимости». Он считал, что необходимость скрывается и за внешней беспорядочностью движений атомов в пустоте. Не отрицая в принципе существования случайных событий, Демокрит и его последователи рассматривали случайность как понятие *субъективное*: не лежащее в природе вещей, а обусловленное нашим незнанием. Известно высказывание Демокрита: «Люди сотворили себе кумир из случая как прикрытие для присущего им недомыслия».

Любопытно, как в рамках атомистической программы Демокрита трактовались ощущения. «От каждой вещи, — утверждал Демокрит, — исходят как бы истечения (образы), попадающие в наши органы чувств, вследствие чего возможно чувственное познание». Эти истечения представлялись в виде тончайших слоев из атомов, которые отделяются все время от поверхности тел и с большой скоростью распространяются по пространству. Когда эти истечения («образы») попадают в глаза, на язык, в уши, в нос, то воздействуют на подобные им атомы, находящиеся в теле человека, и это действие передается затем «атомам души». Таким образом, все ощущения и восприятия — результат взаимодействия атомов «образов тела» с атомами органов чувств и затем с «атомами души».

В атомистическом мире Демокрита нашлось место и богам. Любопытно, что боги у него вполне материальны: они состоят из особых соединений атомов, которые недоступны нашим органам чувств. Лишь

время от времени боги посылают спящим людям свои «образы»; люди воспринимают их во сне. Казалось бы, зачем материалисту Демокриту понадобились боги? Ведь, по Демокриту, движение атомов вечно и не нуждается в высшем начале. По-видимому, богам отводилась роль некоего верховного разума, который для всего (для всех движений мириадов атомов, носящихся в бесконечной пустоте) определяет «закон и необходимость».

В послеаристотелевский период атомистическое учение получило дальнейшее развитие у *Эпикура из Самоса* (IV—III века до н.э.). Его учение отличается большей конкретностью и, можно смело утверждать, большей физичностью. Почему сохнет белье? Потому что под действием солнечного тепла и ветра от него отрываются невидимые глазу атомы воды. Почему стерты каменные ступени храма? Потому что люди уносят на своих подошвах атомы камня. Все явления природы Эпикур стремился объяснить на основе атомистических представлений — как изменения сочетаний (комбинаций) различных атомов.

Различие между учением о природе Эпикура и учением Демокрита было связано главным образом с пониманием сущности случайного и ролью, которую играют боги в картине движений атомов. Демокрит, как уже отмечалось, полагал, что случайность происходит исключительно от нашего «недомыслия» (т. е. является сугубо субъективным фактором) и что все движения всех атомов в мире совершаются «в силу необходимости», определяемой вездесущими богами. Эпикур же полагал, что боги, если даже они и существуют, ни в коей мере не руководят движениями атомов, и поэтому картина движущихся в пустоте атомов должна быть картиной случайных столкновений. Он предположил также существование *самопроизвольных отклонений движущихся атомов*, обусловленных не внешними, а какими-то внутренними причинами. Таким образом, Эпикур, не отрицая существования *субъективной случайности*, допускал, по сути дела, возможность существования *объективной случайности* — случайности, лежащей в основе самой природы движения атомов.

Карл Маркс (1818–1883) в своей докторской диссертации, называвшейся «Различие между натурфилософией Демокрита и натурфилософией Эпикура», отмечал глубокое философское значение этого допущения, сделанного Эпикуром: «...Отклонение атома от прямой линии не есть особое, случайно встречающееся в эпикурейской физике определение. Напротив, закон, который оно выражает, проходит через всю эпикурейскую философию... Эпикурейское отклонение атома измени-

ло всю внутреннюю конструкцию мира атомов». Вот отрывок из книги А.С. Богомолова «Античная философия» (Изд-во МГУ, 1985):

Эпикуреизм, вводя случайное отклонение, спонтанно происходящее при движении атомов, вводит тем самым элемент вероятности, стохастичности природных процессов. Причем случайное отклонение вовсе не беспричинно. В противном случае оно противоречило бы первому принципу его натурфилософии — утверждению, что «ничто не возникает из ничего». Этот момент специально подчеркивает Лукреций: причина отклонения есть, но это не внешняя, как в случае столкновения атомов, а внутренняя причина, включенная в само понятие атома... Эпикур открывает, таким образом, путь к вероятностному пониманию закономерностей микромира, характерному для нашего времени. Однако это лишь догадка, причем не содержащая пока еще никакой тенденции к математизации вероятностных процессов.

Известный российский исследователь истории древнегреческой философии *Михаил Александрович Дынник* (1896–1971) дал следующую характеристику учению Эпикура: «В учении Эпикура о спонтанном отклонении в наивной форме была выражена догадка древнего грека о внутреннем источнике движения материи, была сделана первоначальная, стихийно-диалектическая попытка преодолеть фаталистическую тенденцию детерминизма Демокрита и, исходя из основ его атомистического материализма, усовершенствовав его, нанести решающий удар идеализму и теологии платоников».

Атомистическая физическая программа древних греков поистине удивительна; в ней можно усмотреть предвидение многих сторон современной научной картины мира. Однако в те давние времена эта программа не получила признания и на долгие столетия (на две тысячи лет!) была вытеснена континуалистской программой Аристотеля. Атомистика стала возрождаться лишь в XVII столетии (Гассенди, Гюйгенс, Бойль); она получила мощный импульс к развитию в XIX столетии (благодаря основополагающим трудам Максвелла, Больцмана, Гиббса) и окончательно восторжествовала (разумеется, на качественно новом уровне) в XX веке.

1.5 ПОЭМА ЛУКРЕЦИЯ «О ПРИРОДЕ ВЕЩЕЙ»

Прекрасным литературным памятником античной науке явилась поэма «О природе вещей» римского поэта и философа *Тита Лукреция* по прозвищу *Кар*. Принято считать, что эта поэма была написана Лукрецием примерно в 50 г. до н.э., однако первое ее публичное издание

датируется лишь 1473-м годом (получается, что об этом произведении люди не знали в течение полутора тысячелетий!).

Поэма посвящена Эпикуру, в ней достаточно подробно рассмотрены различные стороны натурфилософии Эпикура. Обращаясь к Эпикуру, Лукреций говорит:

Греции слава и честь! За тобою я следую ныне
И по твоим я стопам направляю шаги мои твердо.
Не состязаться с тобой я хочу, но, любовью объятый,
Жажду тебе подражать...
Отче! Ты сущность вещей постиг. Ты отечески роду
Нашему ныне даешь наставленья, и мы из писаний,
Славный, твоих, наподобие пчел, по лугам цветочным
Всюду собирающих мед, поглощаем слова золотые.

(Текст поэмы Лукреция дается здесь
в переводе с латинского, выполненном *Ф.А. Петровским*).

Мы вправе не согласиться с автором поэмы, который утверждал, что содержащиеся в поэме мысли лишь повторяют мысли Эпикура. Думается, что здесь немало откровений, принадлежавших самому Лукрецию. А возможно, отчасти и тем, кто в течение полутора тысяч лет переписывал рукопись.

Прежде всего отметим *материалистический* дух поэмы, понимание того, что основой страха перед «божьем веленьем» является незнание, неумение разобраться в причинах явлений:

За основание тут мы берем положение такое:
Из ничего не творится ничто по божественной воле.
И оттого только страх обнимает всех смертных, что много
Видят явлений они на земле и на небе нередко,
Коиx причины никак усмотреть и понять не умеют,
И полагают, что все это божьим веленьем творится.

Лукреций критикует учения, предлагавшие в качестве первоосновы либо огонь, либо воздух, либо воду, либо все эти четыре «стихии» вместе с землею:

Те, кто считал, что все вещи возникли
Лишь из огня, и огонь полагали основой мира,
Так же, как те, кто почел за основу всего мирозданья
Воздух, равно как и те, кто думал, что влага способна
Вещи сама созидать, или мнил, что земля образует
Все, превращаясь сама в природу вещей всевозможных,
Кажется мне, далеко от истины в сторону сбились.
К этим прибавь еще тех, кто начала вещей удваивает,

С воздухом вместе огонь сочетая иль воду с землею,
Иль за основу всего принимает четыре стихии:
Именно: землю, огонь, дыхание воздуха, влагу.

Мы находим в поэме вполне аргументированную критику учения Анаксагора о наличии в любой вещи мельчайших «семян» всех вещей:

Анаксагора теперь мы рассмотрим «гомеомерию»...
Он понимает под ней, что из крошечных и из мельчайших
Кости рождаются кости, что из крошечных и из мельчайших
Мышцы рождаются мышц и что кровь образуется в теле
Из сочетанья в одно сходящихся вместе кровинок.
...Так как пища растит и питает нам тело,
Выйдет, что надо считать, будто всякая твердая пища
Так же, как жидкость, сама состоит из вещей чужеродных:
Из сухожилий, костей, и гноя, и крови в смешении...
Если таятся в дровах и пламя, и дым вместе с пеплом,
Из чужеродных вещей и дрова состоят несомненно...
Правдоподобия нет никакого в таком объяснении,
Ибо тогда и зерно, дробимое камнем тяжелым,
Крови следы оставлять должно бы на нем постоянно
Или еще что-нибудь, что есть в нашем теле;
Были б и травы должны подобным же образом часто
Кровь источать из себя при треньи их между камнями...

Достаточно подробно изложено в поэме учение атомистов. Главное положение: мир — это атомы, движущиеся в пустоте:

Всю, самое по себе, составляют природу две вещи:
Это, во-первых, тела, во-вторых же, пустое пространство,
Где пребывают они и где двигаться могут различно.

Лукреций поясняет, что под «телами» он подразумевает здесь «первоначала вещей», «вещей семена». Иначе говоря, это *атомы*. Они *плотны и неделимы* — и в этом залог сохранения материального мира. Именно поэтому мир существует века, не обращаясь в прах. Для разных вещей атомы имеют разную форму и разный характер поверхности. В виде правильных многогранников их представлять нельзя.

То, что нам представляется плотным и твердым,
То состоять из начал крючковатых должно, несомненно,
Сцепленных между собой наподобие веток сплетенных.
В этом разряде вещей, занимая в нем первое место,
Будут алмазы стоять, что ударов совсем не боятся...
Вещи другие, тела у которых текучи и жидки,
Будут скорей состоять из гладких и круглых частичек...

Если ж какая-нибудь представляется горькою жидкость,
Влага морей, например, — то не надо тому удивляться:
Жидкость ее состоит из гладких и круглых частичек,
Но и шершавые к ней примешались, дающие горечь...

Конечно, подобные модели атомов представляются нам сегодня исключительно наивными. Однако вряд ли уместно подчеркивать это, оценивая поэму Лукреция. Гораздо важнее обратить внимание на то, что в данной поэме содержится достаточно глубокая аргументация *идеи дискретности материи*. Если бы материя не состояла из атомов, а была бы непрерывной и потому бесконечно делимой, то, как отмечает Лукреций, не было бы, по сути дела, качественного различия между «наименьшей вещью» и «Вселенной». Образно говоря, всякая вещь могла бы играть роль своеобразной «вселенной» для составляющих эту вещь частей, которые можно представить как угодно малыми, коль скоро возможно любую вещь подвергнуть бесконечному делению. Фактически мы встречаемся здесь (и это важно подчеркнуть!) с мыслью о том, что *природа неинвариантна по отношению к преобразованию подобия* (малое нельзя рассматривать как большое, уменьшенное в какое-то число раз; большое и малое *качественно различны*) и что указанная неинвариантность *непосредственно связана с дискретностью материи*, т. е. с атомистикой. Можно утверждать также, что здесь мы встречаемся с мыслью о необходимости *перехода количественных изменений в качественные*. Все это выражено в поэме до удивления четко:

Если не будет затем ничего наименьшего, будет
Из бесконечных частей состоять и мельчайшее тело.
Так, половина всегда разобьется на две половины
И для деленья нигде не окажется вовсе предела.
Чем отличишь ты тогда наименьшую вещь от Вселенной?
Ровно, поверь мне, ничем. Потому что, хотя никакого
Нет у Вселенной конца, но ведь даже мельчайшие вещи
Из бесконечных частей состоять одинаково будут.
Здравый, однако же, смысл отрицает, что этому верить
Может наш ум, и тебе остается признать неизбежно
Существование того, что совсем неделимо, являясь
По существу наименьшим...

Итак, материя по необходимости состоит из атомов. И атомы отнюдь не пребывают в состоянии покоя, но «гонимые разным движеньем» мечутся в пространстве:

...Телам изначальным, конечно
Вовсе покоя нигде не дано в пустоте необъятной.
Наоборот: непрерывно гонимые разным движеньем,

Частью далеко они отлетают, столкнувшись друг с другом,
Частью ж расходятся врозь на короткие лишь расстоянья,
Сложностью самых фигур своих спутаны будучи пепко...
Прочие, в малом числе в пустоте необъятной витая,
Прядают прочь далеко и далеко назад отбегают
На промежутки большой. Из них составляется редкий
Воздух, и солнечный свет они нам доставляют блестящий...

Все это напоминает картину пылинок, которые мечутся в луче солнечного света:

Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает
В наши жилища и мрак прорезает своими лучами,
Множество маленьких тел в пустоте, ты увидишь, мелькая
Мечутся взад и вперед в лучистом сиянии света;
Будто бы в вечной борьбе они быются в сраженьях и битвах,
Или сходясь, или врозь беспрерывно опять разлетаясь.
Можешь из этого ты уяснить себе, как неустанно
Первоначала вещей в пустоте необъятной мятутся.

Обратим внимание на то, что в поэме подчеркивается *случайный характер* атомных столкновений и, как следствие, случайный характер образования тех или иных вещей из объединившихся друг с другом атомов. Лукреций прямо говорит, что «строгий порядок» сочетаний атомов в вещах возникает *«вовсе не вольно»*, т. е. не по воле какого-либо управителя свыше, а в результате *многократных изменений положений и перебирания многих различных движений*. Он пишет:

Первоначала вещей, разумеется, вовсе не вольно
Все остроумно в таком разместились стройном порядке
И о движениях своих не условились раньше, конечно,
Но многократно свои положения в мире меняя,
От бесконечных времен постоянным толчкам подвергаясь,
Всякие виды пройдя сочетаний и разных движений,
В расположения они, наконец, попадают, из коих
Вся совокупность вещей получилась в теперешнем виде.

Случайный характер атомных столкновений Лукреций вслед за Эпикуром связывает со спонтанными отклонениями движущихся в пространстве атомов, отмечая, что «тела изначальные в некое время в месте неведомом нам начинают слегка отклоняться, так что едва и назвать отклонением это возможно».

Если ж, как капли дождя, они вниз продолжали бы падать,
Не отклоняясь ничуть на пути в пустоте необъятной,
То никаких бы ни встреч, ни толчков у начал не рождалось,
И ничего никогда породить не могла бы природа.

Речь идет здесь о тех случайных отклонениях в движениях атомов, на которые обратил внимание Карл Маркс в своей диссертации.

Далеко не все рассуждения автора поэмы одинаково удачны. Немало ложных догадок содержится в шестой книге поэмы, где Лукреций с позиций науки своего времени пытается объяснить физику различных природных явлений. Так, в попытке объяснить происхождение грома, он указывает несколько причин и всякий раз ошибается:

...Когда через облако дует
Ветер, разносится шум...
В тучах бывают еще и волны, которые будто
Рокот глухой издают, разбиваясь...
Часто гремят, наконец, и рушатся с грохотом громким
Льдины и град, высоко в облаках сокрушаясь огромных,
Ибо, коль ветер сожмет и стеснит их, ломаются горы
Сдавленных туч снеговых, перемешанных с градом холодным.

Ну, что тут поделаешь? — Ведь понятие электричества сформировалось в науке лишь в XVIII столетии.

Впрочем, справедливости ради, отметим, что в поэме Лукреция есть откровения, предвосхитившие научные открытия на много столетий. Так, наблюдая, как более тяжелые тела, падая, обгоняют более легкие. Лукреций совершенно правильно объясняет это тем, что

...Воздуха тонкая сущность
Не в состоянья вещам одинаковых ставить препятствий,
Но уступает скорее имеющим большую тяжесть.

И верно заключает отсюда, что в пустоте все тела должны падать одинаково:

Должно поэтому все, проносясь в пустоте без препятствий
Равную скорость иметь, несмотря на различие в весе.

Нельзя не подивиться такому заключению. Ведь оно сделано за семнадцать столетий до Галилея!

Поэма «О природе вещей» интересна для нас и в другом отношении. Ее автор касается не только естественнонаучных вопросов. Он рассматривает их в органической связи с общественно-гуманитарными вопросами, вопросами морали. Лукреций философствует о жизни и смерти, подчеркивает важность познания мира человеком, пишет о том, что не богатства и не власть, а знания в сочетании со здоровьем представляют собой истинные ценности. Перед нами «природа вещей», которую надлежит воспринимать интегрированно — с самой общей точки зрения. Расставаясь с этой удивительной поэмой, автора которой Карл Маркс назвал «свежим, смелым

поэтическим властителем мира», прислушаемся к великолепным сентенциям, дошедшим до нас из глубины двадцати столетий:

В собственность жизнь никому не дается.
А только на время.
Если же сердце не чисто у нас, то какие боренья,
Сколько опасностей нам угрожают тогда поневоле,
Сколько жестоких забот и терзаний, внушаемых страстью,
Мучат смятенных людей и какие вселяют тревоги!
Тот же, кто в жизни себе кормилом выбрал истинный разум,
Тот обладает всегда богатством умеренной жизни;
Дух безмятежен его, и живет он, довольствуясь малым.

1.6 БЕСЕДА, ПОСВЯЩЕННАЯ ДИАЛЕКТИЧЕСКОМУ МЫШЛЕНИЮ

Читатель. В § 1.1 Вы заметили, что древнегреческие философы хорошо владели *диалектическим методом* и что, по выражению Энгельса, все они были «прирожденными стихийными диалектиками». Хотелось бы поговорить об этом немного подробнее.

Автор. Для примера обратимся к Гераклиту из Эфеса. Одной из проблем, которые его занимали, была *проблема возникновения нового*. Откуда оно берется? Если оно возникает из старого (из прошлого), то не может, строго говоря, считаться новым. Новое должно возникать из того, чего раньше, в прошлом не существовало, т. е., иными словами, из «ничего». Однако может ли возникнуть *нечто* из *ничего*? По-видимому, рассуждал Гераклит, новое одновременно и *отсутствует* в прошлом (в старом), и уже *содержится* в нем. То, чего пока нет (небытие), присутствует в уже имеющемся, чтобы со временем превратиться в бытие. По Гераклиту, все и существует, и не существует, а это возможно лишь при условии, что «все течет и все изменяется». Все существующее наблюдается (сохраняется) только благодаря тому, что оно все время изменяется (не сохраняется). Подобно живому огню. «Этот Космос, — утверждал Гераклит, — один и тот же для всего сущего, не создал никто из богов и никто из людей, но он всегда был, есть и будет вечно живым огнем, мерами загорающимся и мерами потухавшим».

Читатель. А что означают эти загадочные «меры»?

Автор. Для понимания сути диалектического мышления понятие «меры» является принципиальным. Мы обратимся к нему немного позже, а пока вернемся к Гераклиту. Итак, внутреннее единство сущего и несущего (бытия и небытия, старого и нового)

он наглядно представлял в образе непрерывно меняющегося и всегда существующего огня и утверждал единство изменчивости и неизменности каждой вещи в мире и мира в целом. *Изменчивость и сохранение* — это противоположности, которые противоборствуют и в то же время существовать друг без друга не могут. Их сосуществование есть *единство и борьба противоположностей*.

Читатель. Если мне не изменяет память, обо всем этом у нас уже был разговор в книге «Случайность, необходимость, вероятность». Причем вне какой-либо связи с Гераклитом или другими философами античности. Я припоминаю, что в § 2.5 мы обсуждали проблему *возникновения информации*. И говорили о том, что *информация рождается из шума, порядок рождается из хаоса*.

Автор. Более того, обсуждая в теме 7 упомянутой книги феномен *статистической устойчивости*, мы с Вами должны были признать, что хаос внутренне конструктивен и что порядок не просто рождается из хаоса, а уже содержится в нем. Тем самым мы следовали, по сути дела, идеям Гераклита о том, что новое содержится в старом, но обращались при этом не к античному философу, а к таблице случайных чисел.

Читатель. Мы говорили также о *единстве двух противоположностей*.

Автор. Совершенно верно. Параграф 2.6 в книге «Случайность, необходимость, вероятность» так и назывался — «Единство двух противоположностей».

Читатель. Основная мысль состояла в том, что мир существует благодаря *единству и противоборству* таких противоположностей, как порядок и беспорядок, между которыми все время происходят переходы (от порядка к беспорядку, от беспорядка к порядку).

Автор. Напомню, что в § 4.5 эта идея прозвучала более конкретно — как идея *единства и борьбы симметрии и асимметрии*. Если симметрия предполагает *сохранение, общность, необходимость*, то с асимметрией связаны, соответственно, *изменения, различия, случайности*. Единство и борьба симметрии и асимметрии — это единство и борьба сохранения и изменения (вспомним Гераклита), общности и различий, необходимого и случайного. Можно сказать, что мир потому и существует, что в нем противоборствуют сохранение и изменения, общее и частное (общность и различия), необходимость и случайности. Именно это и имеют в виду, когда говорят, что *мир определяется диалектикой симметрии и асимметрии* (точнее сказать, единством и противоборством симметрии и асимметрии).

Читатель. По сути дела нет нужды доказывать фундаментальность вероятностных закономерностей. Ведь именно они *выражают диалек-*

тику необходимого и случайного. Динамические (жестко детерминированные) закономерности не могут рассматриваться как фундаментальные уже по той причине, что они игнорируют диалектику необходимого и случайного.

Автор. Вы совершенно правы. Следует подчеркнуть, что *закон единства и борьбы противоположностей* — один из основных законов диалектики. С двумя другими законами диалектики мы познакомимся в § 4.2 — когда будет отмечаться фундаментальная роль, которую сыграл в развитии диалектического мышления выдающийся немецкий философ *Георг Вильгельм Фридрих Гегель* (1770–1831).

Читатель. А нельзя ли, отвлекаясь от Гераклита и Гегеля, сформулировать саму суть диалектического мышления? В чем именно заключается *специфика* такого мышления?

Автор. Существуют два противостоящих друг другу метода мышления — *диалектический* и *метафизический*. Понять суть диалектики можно, проведя границу между нею и метафизикой. Я хотел бы начать не много издалека и процитировать известные строки *Ф.И. Тютчева*:

Как сердцу высказать себя?
Другому как понять тебя?
Поймет ли он, чем ты живешь?
Мысль изреченная есть ложь...

Итак, подчеркнем: «Мысль изреченная есть ложь». Разумеется, поэт не имел в виду ложь как намеренный обман. Просто он хотел сказать, что попытка сформулировать ту или иную мысль искажает, как правило, сущность мысли. В итоге высказанная (изреченная) мысль оказывается одновременно и истинной, и ложной. Можно сказать, что изреченная мысль *в какой-то мере* содержит правду, а *в какой-то мере* — ложь. Нечто подобное находим и в строках известной поэтессы *Беллы Ахатовны Ахмадулиной* (род. 1937):

Пришла и говорю: как нынешнему снегу
Легко лететь с небес в угоду февралю,
Так мне в угоду вам легко взойти на сцену.
Не верьте мне, когда я это говорю.

Надо понимать: в какой-то мере верьте, а в какой-то мере не верьте.

Читатель. Опять — так, да не так! У поэтов это встречается часто.

Автор. Тут дело не в специфике поэтического восприятия мира. Напомню фразу *Владимира Ильича Ленина* (1870–1924), которую можно найти в его работе «Философские тетради»:

Мы не можем представить, выразить, смерить, изобразить движения, не преврав непрерывного, не упростив, не огрубив, не разделив, не омертвив живого. Изображение движения мыслью есть всегда огрубление, омертвление, и не только движения, но и *всякого* понятия. И в этом *суть* диалектики...

Читатель. Рассматривая тютчевскую фразу «мысль изреченная есть ложь» с этих позиций, придется признать, что в ней отражена сущность диалектики.

Автор. Фактически так оно и есть. Теперь рассмотрим, в чем состоит главное различие между диалектикой и метафизикой. Метафизика — это мышление *крайними категориями*, присущее формальной логике. *Либо да, либо нет — третьего не дано*. Либо верно, либо неверно. Либо можно, либо нельзя. Либо враг, либо друг. Только две краски и никаких полутонов.

Читатель. Формула «либо да, либо нет — третьего не дано» предполагает ясность и четкость мышления. Что в ней плохого?

Автор. Она предполагает категоричность и, как следствие, известную примитивность мышления. Более адекватна действительности формула диалектики: *в какой-то мере да, а в какой-то мере нет*. В какой-то мере можно, а в какой-то мере нельзя. Важно *суметь оценить меру* — меру дозволенности, меру верности полученного результата, меру правды, содержащейся в «изреченной мысли», меру нашего огрубления действительности. Ясно, что нет алгоритмов для определения меры. Ее оценка есть своего рода искусство, которому учат нас *практика, жизнь*.

Читатель. Нам, молодым, по душе категоричность мышления.

Автор. Это и понятно ввиду отсутствия у молодых достаточного жизненного опыта. Лишь с годами усваиваются «диалектические истины» типа «чем дальше в лес, тем больше дров», «чем хуже, тем лучше», «нет худа без добра», «нет правил без исключений». Примитивность метафизического мышления наглядно демонстрируют чиновники-бюрократы. Для них строка в инструкции — окончательная истина. А жизнь все время предлагает ситуации, инструкциями не предусмотренные, поскольку жизнь по самой своей сути *внутренне диалектична*.

Читатель. Выходит, что инструкции не нужны? Они бесполезны?

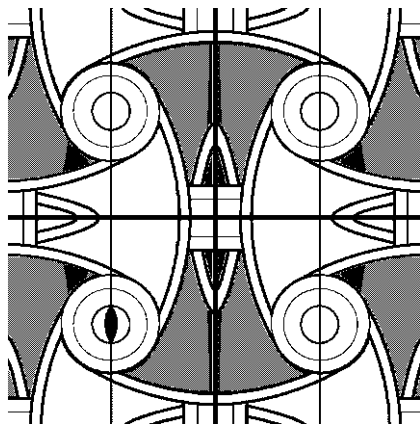
Автор. Они полезны, если относиться к ним диалектически. Если следовать им не безоговорочно, а с учетом ситуации, в той мере, в какой этого требуют ситуация и интересы дела.

Читатель. Метафизически мыслить проще. Тут не надо оценивать меру.

Автор. Именно поэтому человек психологически тяготеет к метафизическому мышлению, стремясь удовлетворить потребность в ясности и четкости — когда все расставлено по своим местам, «разложено по полочкам». Но действительность, практика вынуждают нас отказываться от заманчивой четкости и погружаться в диалектику противоречий, в мир без четких граней, где все верно лишь относительно, лишь в какой-то мере, лишь с учетом конкретной ситуации и конкретного момента.

Читателя. Мне представляется, что категорически отвергать метафизическое мышление не следует. Инструкции, грани, «полочки» в определенной мере все-таки необходимы.

Автор. Вы правы. Закон единства и борьбы противоположностей применим также к диалектике и метафизике.



ЭВОЛЮЦИЯ КОСМОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ, ПОТРЕБОВАВШАЯ ДВА ТЫСЯЧЕЛЕТИЯ (от Филолая и Аристотеля к Копернику и Бруно)

... И этот разум, дробно расточась
По многим звездам, благодать изливает,
Вокруг Единства своего кружась.

Данте

В сравнении с небом Земля не более чем точка или как бы определенное количество в сравнении с бесконечным. Невозможно, чтобы Земли представляла центр мира. Как! Неизмеримое будет вращаться в двадцать четыре часа вокруг ничтожества?

Коперник

2.1 КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПИФАГОРЕЙЦЕВ И ПЛАТОНИКОВ

Самые ранние представления о мироздании исходили из того, что центром Вселенной является *плоская неподвижная Земля*. В античной

науке такие представления просуществовали вплоть до середины IV века до н.э.; заметим, что не только для Анаксагора, но даже для жившего в IV веке до н.э. Демокрита Земля представлялась плоским неподвижным диском. Это вызывает некоторое удивление, поскольку уже во второй половине IV века до н.э. пифагорейцы считали Землю шаром. Впервые упоминание о Земле как о *шаре* встречается в рукописи «О природе», принадлежавшей *Пармениду из Элеи* (IV–V века до н.э.). Конечно, для приверженцев мировой гармонии, считавших сферу наиболее совершенным геометрическим телом, дискообразная Земля не очень-то гармонизировала со сферическим небом. Возможно, именно с этим связан тот факт, что пифагорейцы (а затем платоники) отказались от идеи земного диска в пользу идеи земного шара. Тем самым они отдали предпочтение не цилиндрически симметричной Вселенной, а Вселенной, обладающей сферической симметрией.

При этом, правда, возникала проблема объяснения причин, заставляющих все тела на Земле падать по направлению к центру земного шара. Однако античные философы от этой проблемы, по сути дела, уклонились, объясняя все волей богов (как это сделал, например, Парменид) или попросту рассматривая падение тел на Землю как некое «естественное» движение, не требующее объяснений (как это сделал в свое время Аристотель).

Пифагореец *Филолай из Кротона* (V–IV века до н.э.) нафантазировал систему мира, которую можно назвать *пироцентрической* (от греческого «пир», означающего «огонь»). Согласно этой системе, Земля и прочие небесные тела, включая Солнце, движутся вокруг некоего Центрального огня (называемого также «Огнем Вселенной», «Домом Зевса», «Матерью богов»). Любопытно, что Солнце, по Филолаю, светит отнюдь не собственным светом, а светом, отраженным от Центрального огня. Кроме Центрального огня Филолай придумал дополнительную планету (он назвал ее Антиземлей), которая движется вокруг Огня синхронно с земным шаром, находясь все время строго между Землей и Центральным огнем и тем самым закрывая его от земных наблюдателей. Впрочем, земляне не могут видеть Центральный огонь еще и по той причине, что при своем движении вокруг Огня земной шар поворачивается вокруг себя таким образом, что оказывается все время обращенным к Огню одной стороной, а все люди живут как раз на другой стороне земного шара. По этой же причине земляне не могут видеть Антиземлю.

В общем, Филолай придумал весьма фантастическую Вселенную. В частности, он полагал, что на Луне есть и животные, и растения. Примерно такие же, что и на Земле, но только во много раз крупнее, и

«объясняется» это тем, что на Луне день длится во много раз дольше, чем на Земле.

Мы упоминаем о системе мира по Филолаю лишь по той причине, что это была первая в истории человечества система мира, в которой Земля не считалась центром мироздания. Это была прозорливая догадка. Она же в основном и предопределила неприятие данной системы.

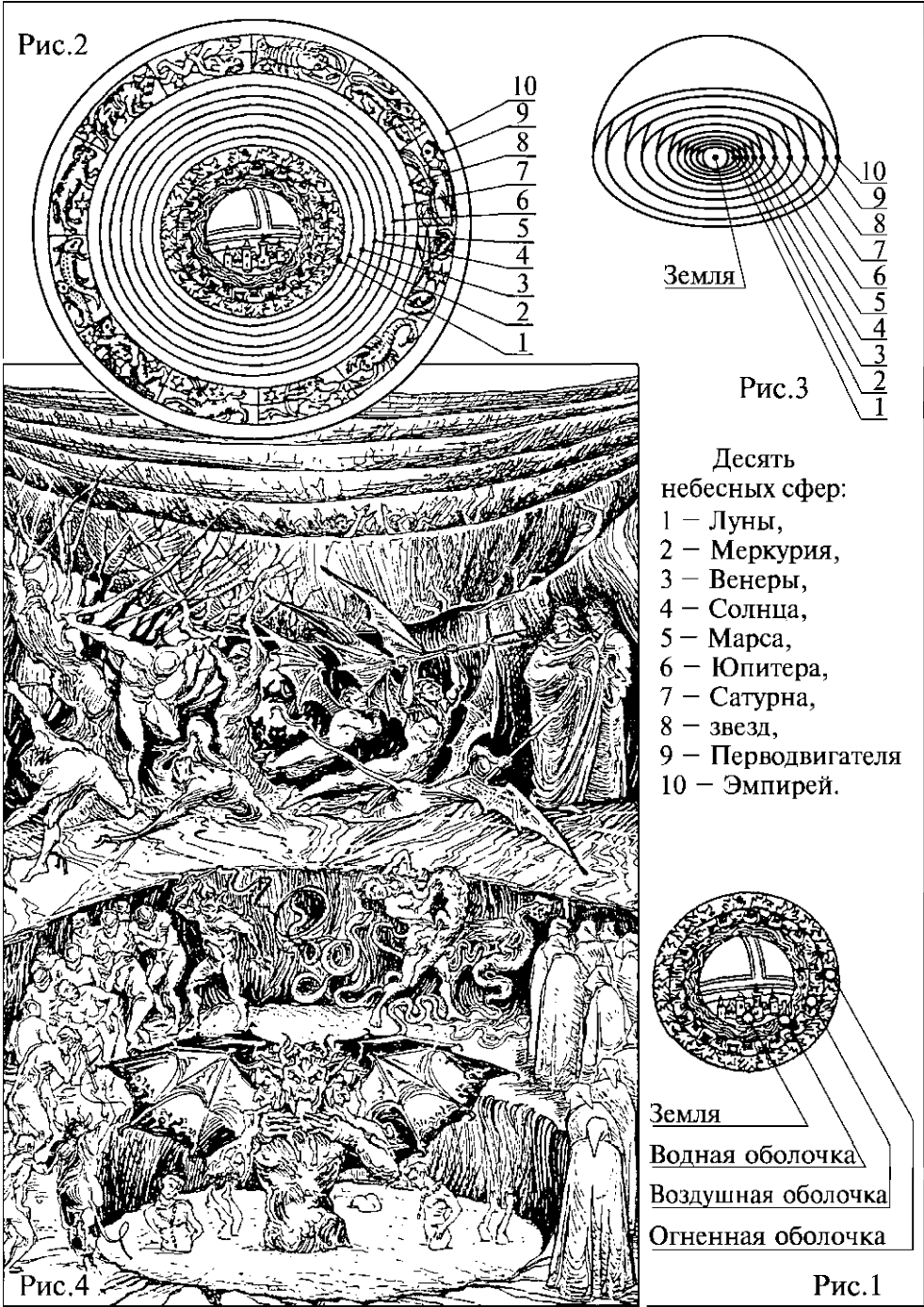
Платон, родившийся на несколько десятилетий позже Филолая и Демокрита, отверг гипотезу Филолая о пироцентрической системе мира и поместил Землю, в полном соответствии с духом времени, в центре мироздания, но, в отличие от Демокрита или Анаксагора уже не в виде неподвижного диска, а в виде неподвижного шара. Так возникла фактически первая *геоцентрическая* система мира.

Платон рассматривал Вселенную в виде восьми вложенных друг в друга *прозрачных сфер*, имеющих общий центр — земной шар. Самая малая сфера — это сфера Луны, затем идут последовательно сферы Солнца, Венеры, Меркурия, Марса, Юпитера, Сатурна, звезд. Все сферы вместе с закрепленными на них небесными телами вращаются вокруг Земли. Благодаря взаимодействию вращающихся сфер друг с другом рождается «музыка сфер», которую могут слышать, понятное дело, далеко не все, а только истинные философы. Идею наличия таинственной связи между небесными движениями и музыкой Платон позаимствовал у Пифагора. «Как наши глаза устремлены к течению светил, — писал Платон в книге «Государство», — так наши уши устремлены к движению стройных созвучий. Музыка и астрономия — словно родные сестры. Так утверждают пифагорейцы, и мы с тобой согласимся с ними».

2.2 ГЕОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИРА ПО АРИСТОТЕЛЮ

Рассматривая геоцентрическую систему мира, предложенную Аристотелем, сразу отметим три ее внешних отличия от геоцентрической системы по Платону. Первое: Аристотель полагал, что земной шар находится внутри трех вплотную примыкающих к его поверхности сфер-оболочек. Первая из них — водная оболочка. Ее обнимает воздушная оболочка, вокруг которой располагается огненная оболочка — см. рисунок 1 в таблице 1. Вокруг Земли и ее оболочек вращаются, по Аристотелю, десять небесных сфер. С каждой из первых семи сфер связано определенное небесное тело, как и в модели Платона. Однако в отличие от платоновской модели (это есть второе отличие) порядок следования планетных сфер от наименьшей к наибольшей здесь несколько

Таблица 1. Модель Вселенной по Аристотелю и Данте



иной: сфера Луны (первое небо), сфера Меркурия (второе небо), сфера Венеры (третье небо), сфера Солнца (четвертое небо), сфера Марса (пятое небо), сфера Юпитера (шестое небо), сфера Сатурна (седьмое небо). Третье отличие от платоновской модели состоит в том, что Аристотель после восьмой сферы (сферы звезд) рассматривает еще две сферы и притом неподвижные — сферу Перводвигателя (девятое небо) и сферу пребывания Бога и душ праведников, которая называется Эмпирей (десятое небо). Все эти сферы условно изображены на рисунках 2 и 3 в таблице 1 (рисунок 2 взят из старинного трактата по астрономии). Аристотель полагал, что Вселенная отнюдь не безгранична, а вся целиком умещается в пределах десятой сферы.

В сочинении «О небе» Аристотель объясняет, почему Земля должна находиться в центре Вселенной и должна быть шаром, притом шаром неподвижным и относительно малых размеров. Эти аргументы состоят из результатов некоторых наблюдений, логических рассуждений и догадок. Они демонстрируют присущую Аристотелю обстоятельность, с какой он стремился рассматривать любую заинтересовавшую его проблему. Приведем отрывок из упомянутого сочинения.

Что Земля по необходимости должна находиться в центре и быть неподвижной, видно потому, что тела, с силою бросаеваемые вверх, падают снова на то же место, даже если сила забросит их на бесконечно большое расстояние. Из этого ясно, что Земля не движется и не находится вне центра Вселенной.

Форма Земли по необходимости должна быть шарообразной, ибо каждая из ее частей имеет вес и стремится вниз до тех пор, пока не достигнет центра. Части Земли подвергаются взаимному давлению и уступают одна другой до тех пор, пока не будет достигнуто ближайшее положение к центру.

Шарообразность Земли доказывается также наблюдениями. Во-первых, во время затмений Луны край тени на ее диске всегда имеет форму дуги. Следовательно, поскольку Луна затмевается потому, что ее заслоняет от Солнца Земля, то причина такой формы тени — округлость Земли. Значит, Земля шарообразна.

Во-вторых, наблюдения звезд с очевидностью доказывают не только то, что Земля круглая, но и то, что она небольшого размера. Если мы немного перемещаемся к югу или к северу, то горизонт явственно становится другим: картина звездного неба над головой значительно меняется. Так, некоторые звезды, видимые в Египте, не видны в северных странах, а звезды, которые в северных странах видны постоянно, в Египте заходят. Из этого ясно не только то, что Земля круглой формы, но и то, что она небольшой шар. Иначе мы не замечали бы указанных изменений столь быстро в результате столь незначительных перемещений.

Как и все античные философы, Аристотель в своих научных изысках не смог избежать фантазирования. Его не могло не смущать то обстоятельство, что центр мироздания (земной шар) во много раз меньше по

массе, чем весь окружающий мир. «Величина Земли ничто в сравнении со всем небом», — подчеркивал ученый в книге «Метеорологика». Получалось, что весь тяжеловесный набор земных сфер вращается вокруг относительно маленького шарика Земли. Вот и пришлось Аристотелю *придумать* таинственный Перводвигатель. Этому Перводвигателю было поручено приводить во вращение все восемь небесных сфер (от сферы Луны до сферы звезд). Сфера Перводвигателя предполагалась при этом неподвижной, и потому было непонятно, каким образом она могла «заставить» вращаться другие сферы. Можно было бы предположить, что сфера Перводвигателя сама быстро вращается и за счет взаимодействия с прочими сферами вовлекает их во вращательное движение. Но тогда пришлось бы доискиваться причин, обусловивших вращение сферы Перводвигателя.

Надо признать, что у Аристотеля, по-видимому, не сформировалось какого-либо окончательного мнения о том, что же именно приводит в движение небесные сферы. В книге В.П. Зубова «Аристотель» (М.: Изд-во Академии наук СССР, 1963) можем прочесть:

Самая ранняя, еще в значительной степени платоновская точка зрения была выражена Аристотелем в диалоге «О философии». Здесь движение неба рассматривалось как сознательное движение одушевленных светил. В книгах «О небе» в разных местах высказаны две противоположные точки зрения: с одной стороны, вечное вращение обусловлено специфическими свойствами небесной материи; с другой стороны, оно вызвано «перводвигателем». В «Метафизике» и «Физике» окончательно утвердилась вторая точка зрения: невозможность «самодвижения» и необходимость неподвижного «перводвигателя». Притом в самом позднем варианте Аристотель не ограничился признанием одного неподвижного двигателя, а утверждал множественность их...

Одним словом, для самого Аристотеля учение о вращающихся небесных сферах и небесных двигателях, приводящих сферы во вращение, не обладало достаточной доказательностью и поэтому вряд ли являлось наукой в строгом смысле.

В связи с этим утрачивает остроту вопрос: полагали ли Платон, а затем Аристотель, что прозрачные небесные сферы с прикрепленными к ним небесными телами действительно существуют? Или же представление о вращающихся сферах — не более, чем метафора, дающая возможность поэтически связать музыку с астрономией? А может быть, введение небесных сфер — чисто математический прием, имеющий целью найти объяснение для наблюдаемых на небосводе перемещений небесных тел? На эти вопросы мы, наверное, не сможем дать определенного ответа.

Казалось бы, долгие размышления Аристотеля о природе и количестве «перводвигателей» указывают на то, что он исходил из реального существования небесных сфер (ведь «перводвигатель» был нужен именно для того, чтобы заставить вращаться эти сферы). К тому же, ни у Платона, ни у Аристотеля (а позднее также ни у Птолемея и ни у Коперника) не было никаких сомнений в реальности существования сферы (именно сферы!) звезд. В то же время известно, что Аристотель рассматривал до 55 небесных сфер. Он писал в «Метафизике»: «У каждой планеты должны быть еще и другие сферы кроме той, в которой движется сама планета... Эти сферы могут вращаться навстречу, ибо только при этом условии планеты могут совершать наблюдаемые перемещения... Число всех сфер вместе взятых, т. е. вращающихся в ту и другую сторону, равняется 55».

Ко всему прочему мы должны принимать во внимание еще одно весьма важное обстоятельство. При рассмотрении вращающихся небесных сфер Аристотель и в особенности Платон вводили в игру такие факторы, как одушевленность небесных тел и божественное руководящее вмешательство. После этого *научный* анализ проблемы, по сути дела, терял смысл.

Впрочем, так ли уж важно выяснить, что думали о небесных сферах древние астрономы? Мы знаем сегодня, что в действительности никаких реально существующих небесных сфер нет, что, соответственно, нет и никаких специальных «перводвигателей» и что звезды вовсе не располагаются на какой-либо сферической поверхности, а «разбросаны» в безднах пространства. Так что к вращающимся небесным сферам следует отнести как к некоторой временной «конструкции», использовавшейся астрономами на определенном этапе процесса познания Вселенной.

2.3 «БОЖЕСТВЕННАЯ КОМЕДИЯ» ДАНТЕ КАК ЭТИЧЕСКАЯ КОНСТРУКЦИЯ ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МИРА ПО АРИСТОТЕЛЮ

Аристотелевская модель Вселенной вдохновила великого итальянского поэта Средневековья *Данте Алигьери* (1265–1321) на создание знаменитой поэмы «Божественная комедия». При этом Данте использовал также древнюю идею «многоэтажной Вселенной», античные и средневековые поверья и, конечно, дал волю собственной творческой фантазии.

О чем эта поэма? Она о добре и зле. Можно сказать, что Данте собрал воедино весь опыт ума и сердца, чтобы сказать людям свое слово «для пользы мира, где добро гонимо». Поэма состоит из трех частей: «Ад», «Чистилище», «Рай». В ней описано вымышленное путешествие поэта сначала по десяти «этажам» Ада (по Преддверию и девяти кругам), затем по десяти «этажам» *Чистилища* и, наконец, по десяти «этажам» *Небесного Рая* (через десять аристотелевских небесных сфер). По кругам Ада и Чистилища Данте проходит с помощью римского поэта Вергилия, жившего в I веке до н.э., а для полета через небесные сферы у него в спутниках Беатриче — женщина, которую поэт нежно любил всю жизнь.

Поэма начинается с того, что, когда «земную жизнь пройдя до половины», Данте заблудился в «сумрачном лесу» греховного мира, ему повстречался Вергилий и пригласил к необычному путешествию:

...И я тебе скажу в свою чреду:

Иди за мной, и в вечные селенья

Из этих мест тебя я приведу.

И ты услышишь вопли иступленья

И древних духов, бедствующих там,

О новой смерти тщетные моленья.

Потом увидишь тех, кто чужд скорбям

Среди огня, в надежде приобщиться

Когда-нибудь к блаженным племенам.

И если выше ты захочешь взвиться,

Тебя душа достойнейшая ждет:

С ней ты пойдешь, а мы должны проститься.

(Здесь и ниже перевод с итальянского М.Л. Лозинского).

Итак, Вергилий предлагает Данте посетить последовательно Ад, где принимают муки души грешников, «бедствующих там», затем Чистилище, где ожидают искупленья раскаявшиеся «в надежде приобщиться когда-нибудь к блаженным племенам», и наконец, Небесный Рай, где обретаются души праведников.

В книге Аристотеля «Этика» человеческие пороки расположены по мере возрастания их тяжести в таком порядке:

- «несдержанность» (развратники, скупцы, моты, грубияны),
- «буйное скотство» (насильники различного типа),
- «злоба» (душевно испорченные люди: обманщики и предатели).

Данте устами Вергилия прямо напоминает о книге Аристотеля:

...Ужели ты не помнишь изречения

Из «Этики», что пагубней всего

Три ненавистных небесам влеченья:

Несдержанность, злоба, буйное скотство?

И что несдержанность — меньший грех пред Богом,

И Он не так карает за него?

В соответствии с аристотелевской шкалой пороков Данте проходит в своей поэме по девяти кругам Ада, спускаясь постепенно до самого дна Ада (до девятого круга), где карается самый страшный порок — предательство. Ад у Данте имеет вид гигантской пропасти в форме воронки, которая, постепенно сужаясь книзу, достигает центра земного шара. Именно там, в центре земного шара, Данте поместил самое страшное место Ада. Склоны гигантской воронки опоясаны круговыми уступами. Эти уступы и есть круги Ада. Художник *М.Ю. Волов* попытался представить их на рисунке 4 в таблице 1.

На первом круге Ада томятся младенцы, умершие без крещения, и люди, не принявшие христианскую веру. На кругах от второго до пятого мучаются те, кто грешил «несдержанностью». На шестом круге терзаются еретики. Наиболее страшные муки ожидают тех, кто попадет на последние три круга. На седьмом мучения претерпевают насильники. Обманщиков поэт разделяет на две категории. Обманщики, которые обманывали тех, «кто не доверился ни в чем», терпят муки на восьмом круге. Но особенно омерзительны, по мнению Данте, те, кто обманывал доверившихся им людей, кто не пощадил «союз доверья, высший и духовный». Имеются в виду предатели. Именно они на самом дне Ада (на его девятом круге). Первыми здесь идут предатели своих близких, за ними более страшные грешники — те, кто предал родину, затем нарушившие закон гостеприимства и, наконец, самые гнусные предатели — те, кто предал своих друзей и благодетелей.

Пройдя через круги Ада, Данте и Вергилий выходят на поверхность земного шара и начинают подниматься на гору Чистилища, знакомясь последовательно со всеми ее «этажами». Вершина горы возвышается над аристотелевской огненной оболочкой земного шара. Именно там Данте встречается, наконец, с Беатриче — и начинается их совместный полет-восхождение через все небесные сферы к Эмпирею — царству Бога.

Врожденное и вечное томленье

По Божьем царстве мчало наш полет,

Почти столь быстрый, как небес вращенье.

В Раю, придуманном Данте, блаженствуют души праведников. Впрочем, степень блаженства у всех разная. На небе Луны Данте и Беатриче встретились с душами тех, кто нарушил обет («Своим обетом, смертный, не играй! Будь стоек и не обещаешь слепо!»). На небе Меркурия

состоялась встреча с честными честолюбцами, которые «стяжать желая хвалу и честь, несли упорный труд». На небе Венеры явились любвеобильные души, на небе Солнца — души мудрецов, на небе Марса — души борцов за веру, на небе Юпитера — души справедливых, на небе Сатурна — души созерцателей.

Поэт потрясен всем тем, что ему довелось увидеть и познать. И это знание он хочет передать людям.

О Вышний Свет, над мыслию земною
Столь вознесенный, памяти моей
Верни хоть малость виденного мною
И даруй мне такую мощь речей,
Чтобы хоть искру славы заповедной
Я сохранил для будущих людей!

По кругам Ада, кругам Чистилища и небесным сферам Рая Данте распределил весь спектр этических категорий, создав тем самым высокохудожественную *этическую конструкцию* геоцентрической системы мира.

2.4 Античная наука между божественным промыслом и случайностью

Читатель. Теперь, когда подошло к концу наше обсуждение научных программ античности, я еще раз задумался над строками из «Природы вещей» Лукреция:

За основание тут мы берем положение такое:
Из ничего не творится ничто по божественной воле.
И оттого только страж обнимает всех смертных, что много
Видят явлений они на земле и на небе нередко,
Коиx причины никак усмотреть и понять не умеют,
И полагают, что все это божьим веленьем творится.

Мне кажется, что столь категоричная точка зрения, решительно отрицающая принципиальную роль «божественной воли», вряд ли может быть отнесена к античной науке в целом. Это — точка зрения материалиста Лукреция и, наверное, Эпикура. Что же касается большинства античных философов, то к ним вполне можно отнести слова по поводу «всех смертных», которые всякий раз, как видят явления, «коиx причины никак усмотреть и понять не умеют», объясняют их «божьим велением».

Автор. Вы правы. Действительно, античные философы довольно часто ссылались на Бога, на «божественное веление», «высший разум». У Анаксагора, например, решительно все объясняется работой высшего разума, божественного движущего начала, именуемого «Нусом». На все «почему?» тут есть один ответ. У Платона высший разум устанавливает вечные идеи и закладывает их в человеческие души еще до рождения людей, а те затем пытаются припомнить эти идеи и тем самым познать материальный мир вещей, которые, подобно теням, изменчивы и подвержены различного рода случайностям. Платон использовал термин «эйдос вещи» (синоним термина «идея вещи») и считал этот эйдос вещи занебесной (и значит, божественной) сущностью вещи.

Читатель. Но разве можно считать *научным* способ познания мира, который для объяснения причин явлений прибегает к ссылкам на некий высший разум, имеющий божественное происхождение?

Автор. Разумеется, нельзя. Научный взгляд на происходящие в мире явления по самой своей сути *несовместим* с религиозным подходом. Строго говоря, обращение к «божьему велению» есть не что иное, как *уход от выяснения причин явлений*.

Читатель. Однако Аристотель подчеркивал важность поиска именно *причин* рассматриваемых явлений.

Автор. Верно. Будучи выдающимся мыслителем, энциклопедически образованным для своего времени, Аристотель всю жизнь преодолевал стереотипы, характерные для образа мышления его знаменитого учителя. Пользуясь платоновским термином «эйдос вещи», Аристотель вкладывал в него, однако, принципиально иной смысл. Аристотелевский эйдос вещи — это тоже сущность вещи, но только не занебесная, не божественная сущность, а сущность «такая, какой она является сама по себе», т. е. сущность *материальная*.

Читатель. А что это меняет в философском плане?

Автор. Такой эйдос вещи может осуществляться не полностью, не в законченном и совершенном виде, а лишь *частично* и *случайно*. И тогда материя может обнаруживать различного рода несовершенства и даже уродливости, в материальном мире могут наблюдаться неожиданные и случайные явления. Можно сказать, что Аристотель, как, наверное, никто другой из античных философов, оказался выразителем глубокой *внутренней драмы* античной науки.

Читатель. Драма античной науки? И в чем же она заключалась?

Автор. Понятно, что если все управляется высшим разумом, то не остается места каким-либо случайностям, каким-либо неопределенностям. Поэтому, стремясь к упорядоченности и детерминизму, античная

наука обращалась к Богу и тем самым переставала быть, строго говоря, наукой. Стремясь, тем не менее, найти *научное*, материалистическое объяснение наблюдаемым явлениям, она *по необходимости* выходила в мир случайного. По Платону, все по-настоящему существенное и по-настоящему существующее, причем существующее вечно — это диктуемые высшим разумом идеи. Поэтому в мире Платона нет места случайному. Эпикур же и в особенности Лукреций, напротив, выводят Бога *за пределы реального мира*, т. е. по сути дела устраняют его. А потому в их мире начинают играть принципиально важную роль *именно случайности*, благодаря которым мириады мечущихся в пустоте атомов, «всякие виды пройдя сочетаний и разных движений, в расположения, наконец, попадают, из коих вся совокупность вещей получилась в теперешнем виде» В целом вся античная наука стремилась, с одной стороны, к *выявлению всеобщей гармонии и всеобщего порядка*, которые гарантировал таинственный высший разум, а с другой стороны, стремилась к *материалистическому объяснению явлений* — и тогда на сцену выступал не менее таинственный Случай.

Читателя. Если есть Бог, то нет Случая; если нет Бога, то должен быть Случай. Не так ли?

Автор. Если выразаться кратко, то именно так. Внутренняя драма самого Аристотеля в том и состояла, что он все время пытался соединить несоединимое, примирить непримиримое. Ему не было дано ни полностью освободиться от идеализма Платона, ни по-настоящему приблизиться к материализму Лукреция. Можно сказать, что Аристотель оставил вечному и совершенному эйдосу Платона только небеса, а «грешную землю» предоставил «в распоряжение» изменчивого эйдоса вещей — того самого, который есть «сам по себе». Как отмечал известный российский философ и филолог *Алексей Федорович Лосев* (1893–1988), автор монументального восьмитомного труда «История античной эстетики», — «по Аристотелю, только космические сферы выше Луны являются эйдетически полноценными, а то, что совершается внутри лунной сферы, это всегда частично и несовершенно, а иной раз даже и совсем уродливо».

Читателя. А ведь тут просматривается аналогия с «Божественной комедией» Данте!

Автор. Действительно просматривается. По Данте, все уродливое, все порочное «упрятано» под землю и распределено по кругам Ада, а все разумное, гармоничное, вечное, все, что «от Бога» почит на небесах, будучи распределено по небесным сферам. Внизу Хаос, внизу Зло, противостоящее высшему разуму и потому караемое. Вверху,

на небесах Космос, порядок, гармония. Там Добро, олицетворяющее высший разум. Можно сказать, что «Божественная комедия» Данте воспроизводит в этическом плане внутреннюю драму античной науки.

Читатель. Но в таком случае получается, что если божественный высший Разум — это Добро с большой буквы, то Случайное есть рассматриваемое тоже с большой буквы Зло!

Автор. Именно такой общей точки зрения как раз и придерживалось человечество на протяжении многих веков — вплоть до XX-го столетия.

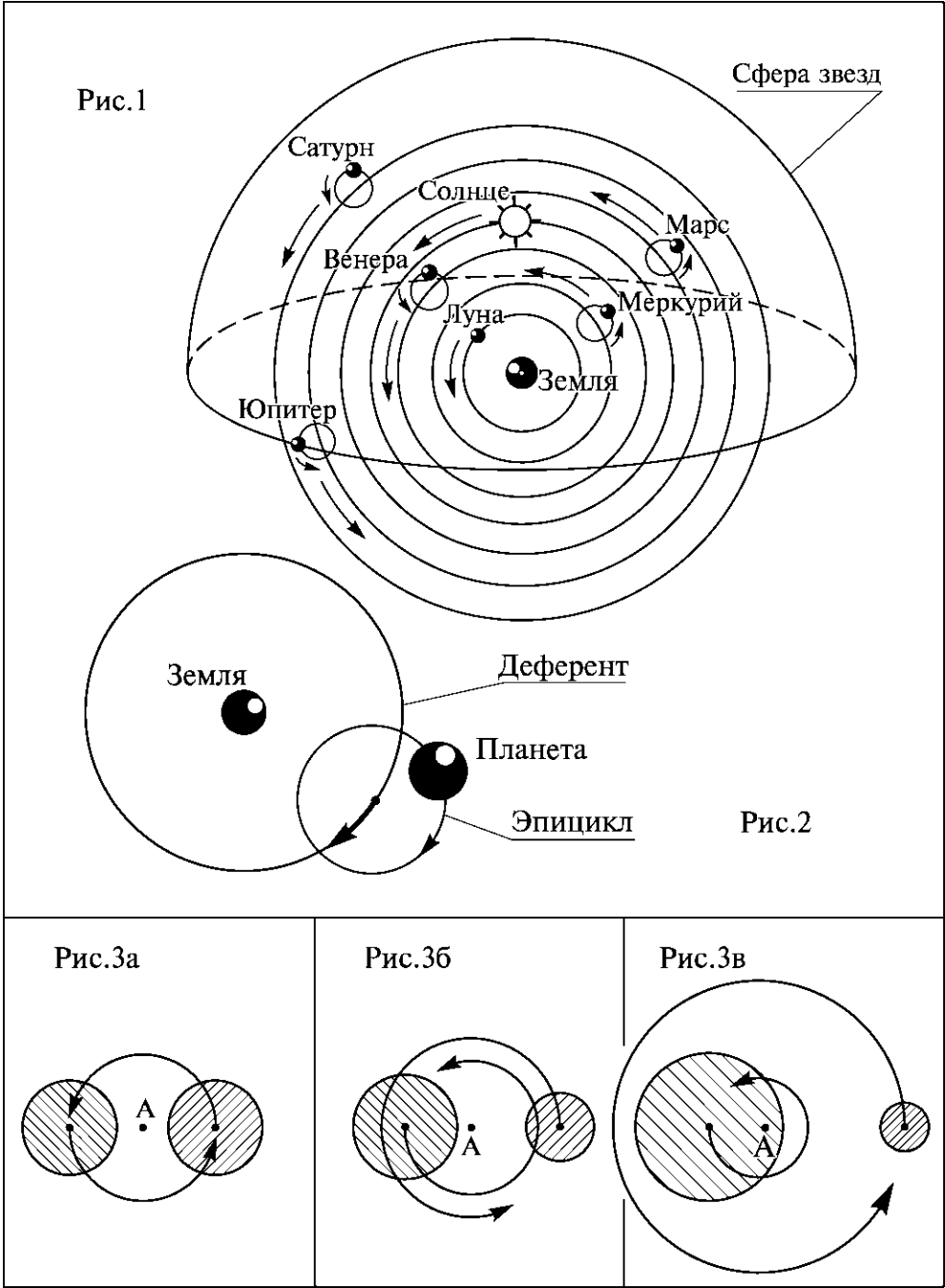
2.5 ГЕОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИРА ПО ПТОЛЕМЕЮ

За шесть столетий аристотелевская модель Вселенной во многом изменилась к лучшему. Из прежних десяти небесных сфер сохранилась только сфера звезд, продолжающая вращаться вокруг неподвижного земного шара. Сфера Перводвигателя и Эмпирей вообще исчезли, а сферы семи небесных тел (Луны, Меркурия, Венеры, Солнца, Марса, Юпитера, Сатурна) преобразовались в орбиты, лежащие в общей плоскости, перпендикулярной к Оси мира, вокруг которой вращается сфера звезд. Центр земного шара стал общим центром этих орбит. Вселенная по-прежнему оставалась пространственно ограниченной — ее размеры определялись теперь радиусом сферы звезд (см. рисунок 1 в таблице 2).

Такую модель Вселенной рассматривал ученый из Александрии *Клавдий Птолемей* (II век н.э.), вычисляя положения на небосводе Луны, Солнца и известных в те времена пяти планет. С Луной и Солнцем у Птолемея особых затруднений не возникло. Но вот планеты вели себя довольно своенравно. Перемещаясь по небосводу на фоне звезд, они останавливались и начинали двигаться в обратную сторону, как бы петлять — в полном соответствии со своим общим названием (греческое слово «планета» означает «блуждавший»).

Стремясь преодолеть трудности, связанные с планетами. Птолемей предположил, что движение каждой из пяти планет вокруг Земли следует представлять так: планета движется по окружности (по *эпициклу*) вокруг воображаемого центра, который движется по окружности (по *деференту*) вокруг неподвижной Земли — см. рисунок 2 из таблицы 2. Используя такое предположение, Птолемей сумел с хорошей точностью вычислить положения планет на небосводе. Так появилась представленная на рисунке 1 *геоцентрическая система мира по Птолемею*.

Таблица 2. Геоцентрическая система мира по Птолемею



Ученый изложил ее в фундаментальном труде «Великое математическое построение астрономии в тринадцати книгах». Позднее арабы дали этому труду краткое и выразительное название «Альмагест», что означает «Величайший». Этот труд стал настоящей энциклопедией для астрономов и был таковой в течение полутора тысячелетий.

Учитывая эти полтора тысячелетия, поневоле хочется спросить: Неужели система мира по Птолемею была столь совершенна? Не будем спешить с утвердительным ответом. Очень многим эта система с ее эпициклами и деферентами представлялась излишне сложной, надуманной. Говорят, что король *Альфонс X* высказался в начале XIII столетия так: «Если бы Бог посоветовался со мной, прежде чем создавать Вселенную, я, несомненно, предложил бы Ему сотворить нечто более простое и логичное».

Король не был ученым, однако он верно уловил «нелогичность» системы Птолемея. Вспомним, что еще Аристотеля смущал тот факт, что огромное Солнце должно вращаться вокруг маленькой Земли. Правда, в модели Аристотеля Солнце двигалось вроде бы не само по себе, а было укреплено на твердой сфере, которую приводил во вращение некий «перводвигатель». Но в птолемеевской системе нет ни перводвигателя, ни планетных сфер и надо рассматривать непосредственно движение небесных тел относительно друг друга. Разумеется, трудно понять, что же могло бы заставить планету описывать окружности вокруг пустого места, которое, к тому же, само обращается вокруг земного шара.

Нетрудно убедиться в несостоятельности идеи движения небесных тел по эпициклам и деферентам. Для этого достаточно доказать, что одиночное тело не может кружиться вокруг пустого места (даже в том случае, когда это место само никуда не движется). Нам помогут весьма простые рассуждения. Представим себе два одинаковых небесных тела вблизи друг друга. Как им «решить», кто вокруг кого должен обращаться? Поскольку тела одинаковы и, значит, оба находятся в равном положении, то из соображений симметрии им не остается ничего иного, как обоим кружиться вокруг точки *A*, находящейся точно посередине между центрами тел — см. рис. 3а в таблице 2. Если одно из тел тяжелее другого, то центр общего вращения *A* сместится к центру более тяжелого тела. Тяжелое тело будет описывать вокруг *A* более короткую орбиту, а легкое — более длинную (см. рис. 3б). Чем сильнее различаются тела по массе, тем ближе к центру большего тела смещается центр вращения *A*. В случае системы Земля-Луна центр *A* оказывается на расстоянии около 5 тысяч километров от центра земного шара (рис. 3в).

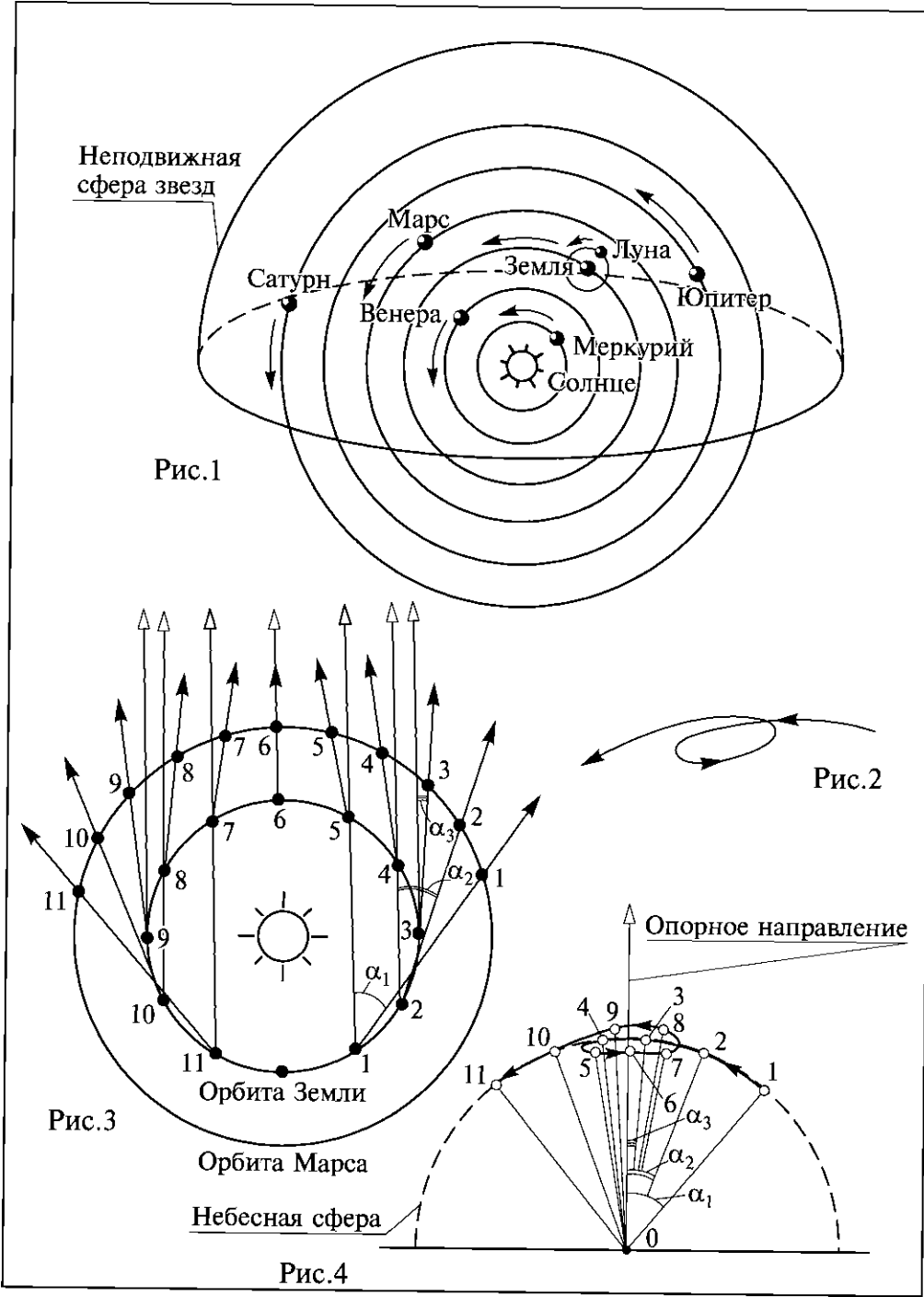
2.6 ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИРА ПО КОПЕРНИКУ

Поскольку, как это иллюстрирует рисунок 3 в таблице 2, центр вращения *A* находится ближе к тяжелому, а не к легкому телу, то вполне очевидно, что вращение тяжелого тела вокруг очень легкого, а тем более вокруг пустого места, оказывается невозможным. Таким образом, гипотезу Птолемея с ее эпициклами и деферентами надо признать несостоятельной. Можно допустить, что такой вывод делался и раньше — в те времена, когда только что появившаяся система Птолемея пока еще вызывала всеобщее восхищение тем, что позволяла вычислять положения планет на небосводе. Надо полагать, что уже в те времена для многих была очевидна несостоятельность эпициклов и деферентов и необходимость поиска иного объяснения странного поведения планет.

И такое объяснение было найдено. Его нашел в XVI столетии польский астроном *Николай Коперник* (1473–1543). Он догадался, что траектории, описываемые планетами на звездном небе, представляются нам странными по той простой причине, что мы наблюдаем их не с неподвижного земного шара, а с земного шара, который, как и другие планеты, обращается вокруг неподвижного Солнца. Это означало, что в модели Вселенной необходимо произвести весьма существенное изменение: поместить в центр мироздания Солнце, а Землю «заставить» обращаться вокруг него (наряду с другими планетами). Так появилась *гелиоцентрическая система мира по Копернику* — см. рисунок 1 в таблице 3. Сравнивая эту систему мира с птолемеевой системой, обнаруживаем следующие изменения. Солнце и Земля поменялись местами. Луна обращается теперь не вокруг центра мироздания, а вокруг Земли. Планеты Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн движутся теперь не по эпициклам с деферентами, а по *круговым орбитам* вокруг центра мироздания — Солнца. Размеры Вселенной по-прежнему ограничены сферой звезд, но теперь сфере звезд нет нужды вращаться вокруг центра мироздания; теперь сфера звезд неподвижна.

На примере Марса покажем, как система Коперника объясняет возникновение петлеобразных траекторий планет (марсианская петля, описываемая в течение года, изображена на рисунке 2 в таблице 3). На рисунке 3 в таблице 3 показаны две окружности — это орбиты Земли и Марса (учтем, что Марс в 1,5 раза дальше от Солнца, чем Земля). Точки с *I* по *II* на орбите Земли показывают, где находится Земля в начале января (точка *I*), февраля (точка *2*), марта (точка *3*) и т. д. Такими же точками на орбите Марса показано, где в соответствующие месяцы оказывается Марс. Заметим, что на Марсе год в 2 раза длиннее, чем на

Таблица 3. Гелиоцентрическая система мира по Копернику



Земле. Когда Земля описывает 12-ю часть своей орбиты. Марс описывает только 24-ю часть своей орбиты. Выберем направление на какую-то конкретную звезду; назовем его опорным направлением (на рисунке это направление строго вверх). Отметим, под каким углом к опорному направлению виден с Земли Марс в разные месяцы. В январе этот угол есть α_1 , в феврале — α_2 , в марте — α_3 и т. д.

А теперь обратимся к рисунку 4 в таблице 3. Представим себе, что в точке O стоит земной наблюдатель. Пунктирной линией показана небесная сфера, на которую смотрит наблюдатель. В январе направление на Марс образует с опорным направлением угол α_1 ; поэтому на небесной сфере Марс виден в точке 1. В феврале угол между направлением на Марс и опорным направлением есть α_2 . Марс на небесной сфере виден в точке 2. В марте Марс будет виден на сфере в точке 3, в апреле — в точке 4, в мае — в точке 5 и т. д. Если мы проведем линию последовательно через точки 1, 2, 3,..., 11, то как раз получим наблюдаемую на звездном небе загадочную марсианскую петлю.

Понятно, что система Коперника вызвала недовольство церкви — ведь идея о движении Земли вокруг Солнца противоречила Божественному Писанию. Один из самых видных богословов Средневековья Мартин Лютер (1483–1546) опровергал систему Коперника цитатами из Библии и заявлял: «Говорят о каком-то новом астрологе, который доказывает, будто Земли движется, а Солнце и звезды неподвижны. Будто происходит то же, что при движении в повозке, когда едущему кажется, что он сидит неподвижно, а земля и деревья бегут мимо него. Ну, да ведь теперь всякий, кому хочется прослыть умником, старается выдумать что-нибудь особенное». Надо заметить, что Лютер попал в точку, так что его ирония была неуместна.

Сегодня трудно поверить, как много было возражений против гелиоцентрической системы Коперника. Считали даже, что она противоречит здравому смыслу. Возникло множество вопросов. Если Земля не покоится в центре мироздания, а мчится в космосе, то почему тела должны падать к ее центру? Почему они не падают к центру Солнца или, по крайней мере, не сопровождают земной шар в его движении вокруг Солнца? Чтобы ответить на подобные вопросы, ученым пришлось всерьез заняться изучением законов механики.

Любопытно, что систему Коперника не принял известный датский астроном *Тихо Браге* (1546–1601). Он предложил свою модель Вселенной. В ней планеты (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн) обращаются вокруг Солнца, но само Солнце при этом обращается вокруг

центра мироздания — Земли. Вокруг неподвижной Земли обращается также Луна.

НЕЗАПЛАНИРОВАННЫЙ ДИАЛОГ

Читатель. Коперник создал свою систему в XVI столетии. Странно, почему до него никто не высказывал идеи о том, что Солнце, а не Земля является центром мироздания.

Автор. Эта идея высказывалась задолго до Коперника и даже до Птолемея. Я имею в виду древнегреческого ученого *Аристарха из Самоса* (III век до н.э.). Он полагал, что Земля и все планеты обращаются вокруг Солнца, являющегося центром Вселенной, а вокруг Земли обращается только Луна. Он полагал, что Земли вращается также вокруг своей оси, чем и объясняется смена дня и ночи. Аристарх был публично обвинен в богохульстве и изгнан из Александрии.

Читатель. Все-таки удивительно, что здравая идея не нашла понимания, а вот система Птолемея нашла. Несмотря на то, что в основе этой системы лежала явно нелепая идея об обращении тела вокруг пустого места, которое, к тому же, описывает круговую орбиту.

Автор. Система Птолемея действительно несостоятельна. Но она была встречена с энтузиазмом, так как, во-первых, позволяла делать вычисления, неплохо совпадающие с данными астрономических наблюдений за перемещениями планет на небосводе. Во-вторых, эта система не противоречила Божественному Писанию. Возможно, были и другие причины. Лично мне представляется невероятным разрыв в четырнадцать столетий между птолемеевской и коперниковской системами мира.

Читатель. Может быть, в период со второго по шестнадцатый век у людей были дела, которые сильно отвлекали их от занятий астрономией, от размышлений о Вселенной?

Автор. Дела, разумеется, были. Они всегда есть. Во все времена происходили войны, смуты, революции. Однако трудно понять, каким образом подобные дела, а также те или иные вероучения смогли погасить у ученых интерес к астрономии на протяжении четырнадцати веков. Равно, как и непонятно, почему столь активно развивавшиеся во времена античности атомистические представления перестали интересовать людей на такой же длительный срок — вплоть до XVI—XVII столетий.

Читатель. А вдруг мы все пользуемся испорченной хронологической шкалой и поэтому неправильно датируем давние события?

Автор. Именно такое предположение выдвинули и разрабатывают российский академик *Анатолий Тимофеевич Фоменко* (род. 1945) и его ученики (см., например, А.Т. Фоменко. Глобальная хронология. М.: Изд-во МГУ, 1993).

2.7 ЕСТЬ ЛИ У ВСЕЛЕННОЙ ЦЕНТР?

Как у Птолемея, так и у Коперника вся Вселенная «умещалась» в пределах сферы звезд и, естественно, *имела центр*. У Птолемея центром Вселенной считалась Земля, а у Коперника — Солнце. Однако уже в античную эпоху существовало *принципиально иное* мнение относительно наличия у Вселенной центра и ограниченности Вселенной в пространстве. В поэме Лукреция «О природе вещей» прямо говорится:

Нет никакого конца ни с одной стороны у Вселенной,
Ибо иначе края непременно она бы имела...
Где бы ты ни был, везде, с того места, что ты занимаешь,
Все бесконечной она остается во всех направлениях.

И там же делается вывод:

Центра нет нигде у Вселенной, раз ей никакого
Нету конца...

Как нетрудно понять, Лукреций высыпает против аристотелевской модели Вселенной. Он убежден, что Вселенная пространственно бесконечна и что у нее *вообще нет какого-либо центра*. Эта пророческая мысль была высказана в первом веке до нашей эры. Затем по неизвестным причинам она была предана забвению в течение полутора тысяч лет.

Идею Лукреция о бесконечности Вселенной возродил в XV веке немецкий философ *Николай Кузанский* (1401–1464). В своем труде «Об ученом познании» он утверждал, что нет оснований считать Землю или какое-либо другое небесное тело центром Вселенной. По образному выражению Кузанского, «центр мира везде, а его граница нигде».

Идеи Кузанского оказали большое влияние на итальянского философа *Джордано Бруно* (1548–1600). Коль скоро нет центра у Вселенной, то не должно быть и звездной сферы, окружающей этот центр. Значит, звезды не располагаются на какой-то сфере, а «рассыпаны» в глубинах безграничного пространства. Джордано Бруно понял, что систему Коперника следует рассматривать *не как модель всего мироздания, а как*

модель, описывающую планетарную систему Солнца. Подобные планетные системы, по мнению Бруно, должны быть у многих других звезд. И, возможно, на каких-то из этих планет существует жизнь.

В 1584 году появились основные труды Джордано Бруно: «О причине, начале и едином» и «О бесконечности, Вселенной и мирах». Мирами он называл обитаемые планеты, уподобляемые Земле.

Исключительно смелые идеи Джордано Бруно о множествах миров в бесконечной Вселенной вызвал негодование у церкви. Свободолюбивый и неуступчивый характер ученого, широта его интересов, нежелание считаться с какими-либо авторитетами и догматами — все это накаляло страсти; в результате он был арестован в 1593 году по обвинению в богоотступничестве. В течение семи лет пребывания в тюрьме ученый подвергался многократным предложениям отречься от своих взглядов. Он не отрекся и 17 февраля 1600 года был сожжен на костре в Риме на площади Цветов.



СЕМНАДЦАТОЕ И ВОСЕМНАДЦАТОЕ СТОЛЕТИЯ: ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ МИРА

Ньютон заложил основы той совокупности законов природы, которая позволяет понять законы всех явлений. Ньютон считал, что этого можно достичь за счет сведения любых процессов к движениям частиц, взаимодействующих между собой. Эта программа продержалась вплоть до второй половины XVIII века и доказала свою плодотворность в области физики.

Альберт Эйнштейн

3.1 СТАНОВЛЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Многие столетия люди наблюдали падение подброшенного вверх камня. Великий итальянский ученый *Галилео Галилей* (1564–1642) был первым, кто сумел разглядеть за этим падением определенный физический

закон. Изучая кинематику движения тел, он фактически заложил основы той науки, которую мы сегодня называем *классической механикой*.

Галилей рассматривал движение, используя понятие *инерции*. Это было принципиально важно и ново. Ведь господствовавшая в то время аристотелевская концепция движения, просуществовавшая две тысячи лет, не знала понятия инерции. Считалось, что всякое движение (кроме так называемых «естественных» движений) требует *непрекращающегося воздействия*; прекращение воздействия должно приводить к немедленному прекращению движения. Галилей отказался от такой концепции, справедливо полагая, что в безынерционном мире, где все определяется только сиюминутными воздействиями, исчезает, по сути дела, связь прошлого с настоящим, а настоящего с будущим. По иронии судьбы, мир, «сконструированный» человеком, поставившим отыскание причин главной целью науки (мир Аристотеля), оказался миром, исключаящим причинно-следственные связи.

Используя понятие инерции, Галилей объяснил, почему Земля при движении по орбите вокруг Солнца (а также при вращении вокруг своей оси) сохраняет как атмосферу, так и все, что находится в атмосфере и на земной поверхности. Мы не замечаем движения Земли, поскольку все явления на Земле происходят точно так же, как если бы она была неподвижной, — здесь проявляется открытый Галилеем принцип относительности для механических явлений. Сегодня он известен как *принцип относительности Галилея*.

До Галилея физика и математика существовали фактически порознь. Физики занимались умозрительным объяснением причин различных явлений, тогда как математики работали с моделями, придуманными для описания рассматриваемых явлений, не претендуя на раскрытие их причин. Галилей устраняет это различие между физическим и математическим рассмотрением явлений, между физическим опытом и математической теорией. Он по праву может считаться одним из основателей классической механики, поскольку сделал два принципиально важных шага: обратился к *физическому опыту* и стал использовать *математическую теорию*. Это и привело к рождению классической механики.

Становление и дальнейшее развитие классической механики зависело, естественно, от активности действий в обоих указанных направлениях. Математическое направление активно развивалось знаменитым французским математиком, философом, физиком *Рене Декартом* (1596–1650). Он заложил основы *аналитической геометрии*, применил ее аппарат к описанию перемещений тел. Декарт ввел понятия *переменной величины* и *функции*. В «Началах философии» Декарта, опубликованных в

1644 году, сформулированы три «закона природы». Первые два выражают принцип инерции. Первый закон: «Каждая вещь, поскольку это зависит от нее, всегда сохраняет свое состояние, и если однажды пришла в движение, то таковое и будет продолжать». Второй закон утверждает, что хотя в действительности все движения круговые (так считал Декарт), однако каждое тело по отдельности всегда «стремится» (опять это аристотелевское «стремится»!) продолжить движение по прямой линии. В третьем законе обычно усматривают не вполне удачно сформулированный закон сохранения количества движения: движущееся тело при столкновении с другим телом «теряет в своем движении столько, сколько сообщает второму телу».

Решающий вклад в становление механики внес великий английский ученый *Исаак Ньютон* (1643–1727). Именно благодаря ему эксперимент начал, наконец, играть фундаментальную роль. Недаром Ньютон называл создаваемую им *математическую физику* «экспериментальной философией» и провозгласил принцип: «гипотез не измышляю». Если Декарт и его последователи шли от *умозрительных* «самоочевидных» общих положений («гипотез») к менее общим через дедукцию, то Ньютон предпочитал идти *от опыта к обобщениям на основе метода индукции*. Он противопоставлял отвлеченному рационализму Декарта продуманное экспериментальное обоснование получаемых результатов. Было бы, однако, неверно рассматривать метод Ньютона как чисто эмпирический. Заявляя «гипотез не измышляю», он просто хотел подчеркнуть принципиальное отличие своего метода исследования природы от метода Декарта. В действительности же Ньютон уделял много внимания осмыслению экспериментальных фактов, философским основаниям; он отдавал должное (там, где считал нужным) гипотезам и предположениям.

В 1687 году вышел в свет фундаментальный труд Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии». Переводчик этого труда на русский язык академик *Алексей Николаевич Крылов* (1863–1945), известный кораблестроитель, математик и механик, писал: «В сочинении Ньютона все было ново: начиная с аксиом или законов движения и кончая величайшим из законов природы — законом всемирного тяготения, математически выведенным из законов планетарных движений, данных Кеплером».

Ньютоновские «Начала» открываются своеобразным введением, где даются определения некоторых физических понятий и формулируются три основных закона движения — те самые *законы динамики Ньютона*, которые поныне обязательно входят в учебники физики (как школьные, так и вузовские). Затем излагаются собственно «начала механики», разбитые на три книги, каждая из которых разделена

на несколько отделов (всего 24 отдела). Ньютон начинает с того, что дает определения массы, количества движения, силы. Вот как звучит в переводе, сделанном А.Н. Крыловым, ньютоновское определение силы:

«Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия не остается в теле. Тело продолжает затем удерживать свое новое состояние вследствие одной только инерции». Знаменитые законы динамики даны Ньютоном в следующей формулировке:

Закон 1. Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Закон 2. Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Закон 3. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны».

В *книге первой* Ньютон рассматривает движение материальной точки под действием центральной силы, исследует задачу двух тел, ставит задачу трех тел, приводит ряд оптических задач. *Книга вторая* содержит учение о движении тел в среде, сопротивление которой пропорционально первой или второй степени скорости. Здесь даны основы «метода флюксий» — так Ньютон называл *исчисление бесконечно малых* (на современном языке: дифференциальное и интегральное исчисление). В *третьей книге*, названной «О системе мира», рассматриваются различные астрономические проблемы, и устанавливается знаменитый *закон всемирного тяготения*: «Любые два тела притягиваются друг к другу с силой, которая направлена по линии, их соединяющей, прямо пропорциональна массам обоих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними».

Особо отметим, что Ньютон объяснил и доказал законы, сформулированные известным немецким астрономом *Иоганном Кеплером* (1571–1630) — *первый закон*: каждая из планет движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце; *второй закон*: вектор, проведенный от Солнца к планете, описывает в равные времена равные площади; *третий закон*: квадраты времен обращения любых двух планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.

Одновременно с Ньютоном и независимо от него разработал основы дифференциального и интегрального исчисления известный немецкий математик, философ, физик, языковед *Готфрид Вильгельм Лейбниц* (1646–1716). Этот факт нашел отражение в ньютоновских «Началах». Ньютон писал там: «В письмах, которыми около десяти лет тому назад я обменивался с весьма искусным математиком Лейбницем, я сообщал ему, что обладаю методою для определения максимумов и минимумов, проведения касательных и решения тому подобных вопросов. Знаменитей-

ший муж отвечал мне, что он также напал на такую методу, и сообщил мне свою методу, которая оказалась едва отличающейся от моей, и то только терминами и начертанием формул».

Исаак Ньютон — грандиозное и удивительнейшее явление в истории науки. Как справедливо отметил его современник, известный английский астроном и геофизик, *Эдмунд Галлей* (1656–1742), прочитав ньютоновские «Начала», «никогда еще ничего подобного не было создано силами одного человека». Можно сказать, что Ньютон подобен некоему узлу, в котором сошлись нити из прошлых веков и из которого берут начало нити, протянувшиеся в будущие века. *До Ньютона механика только еще создавалась, после Ньютона она уже существует.* Он предопределил дальнейшее и притом довольно бурное развитие физической науки вообще и механики в частности. Через девять лет после его кончины, в 1736 году выходит в свет «Механика» знаменитого *Леонарда Эйлера* (1707–1783), где ньютоновская механика излагается аналитически, на языке алгебраических формул (сам Ньютон пользовался языком геометрии). Особую стройность приобрела ньютоновская механика в изданной в 1788 году «Аналитической механике» знаменитого французского математика и механика *Жозефа Луи Лагранжа* (1736–1813).

3.2 МИР ДЕКАРТА И МИР НЬЮТОНА

Декарт и Ньютон — это два принципиально разных подхода к постижению мира. У Декарта на первом плане пронизательность ума; он убежден, что можно *чисто умозрительно* с помощью интуиции и логических рассуждений построить картину мира. Ньютон исходил из *экспериментальных исследований* — он шел к картине мира не от изящных догадок и озарений, а от результатов тщательно продуманных опытов. Естественно, что миры Декарта и Ньютона оказались весьма разными. И хотя мы, безусловно, отдаем предпочтение научности ньютоновского подхода к изучению природы, тем не менее мы не можем не уделить внимания также Декарту. Ньютоновская картина мира создавалась, в известном смысле, в борьбе с картезианскими представлениями (картезианцами называли последователей Декарта; Картезий — латинизированное имя Декарта).

В *мире Декарта* материя тождественна пространству, все пространство заполнено материей, пустоты нет. Атомы отрицаются, материя делима до бесконечности. Предоставим слово самому Декарту:

«Пространство, или внутреннее место, разнится от телесной субстанции, заключенной в этом пространстве, лишь в нашем воображении. В действительности же протяжение в длину, ширину и глубину, составляющее пространство, составляет и тело... Если спросят, что случилось бы, если бы Бог устранил тело, содержащееся в данном сосуде, и не допустил, чтобы другое тело проникло на покинутое место, то на этот вопрос нужно ответить: в таком случае стороны сосуда сблизятся настолько, что непосредственно сомкнутся, ибо когда между двумя телами не находится ничего, то они необходимо должны касаться друг друга... Невозможно существование каких-либо атомов, неделимых по своей природе, как это вообразили некоторые философы. Если бы Бог и сделал частицу столь малой, что невозможно было бы ее разделить чему-нибудь сотворенному Богом, то самого себя Он не мог бы лишить власти разделить ее, ибо совершенно невозможно, чтобы Бог умалил свое могущество...»

(Все это не очень-то легко воспринять: впрочем, Декарт вообще предпочитал изъясняться запутанно, «чтобы лишить завистников возможности сказать, что все это они давно знали».)

Все явления Декарт сводит к механическим перемещениям. Все взаимодействия осуществляются по той причине, что одни части материи *давят* на другие, *толкают* их. Но как же возможно движение в мире, полностью заполненном материей? — Очень просто, — объясняет Декарт, — одно тело вступает на место другого, выталкивая его со своего места, это второе вступает на место третьего, третье — на место четвертого; и таким путем до тех пор, пока последнее тело не займет место первого. В результате получается вихревое движение (движение по кругу). Весь мир, по Декарту, заполнен разнообразными *вихрями*.

Заметим, что беспредельную делимость материи Декарт не вполне последовательно сочетает с существованием «частиц материи» («частиц пространства?»), коих различает три типа: вездесущие частицы неба, частицы огня и частицы плотной материи. В целом схема мира по Декарту такова. Есть два начала — материя и движение. Движение производится силой, исходящей от Всевышнего. Эта же сила делит непрерывную материю на частицы и сохраняется в них, являясь источником их вихревого движения, при котором одни частицы выталкиваются со своих мест другими.

Как же представлял себе мир Ньютон? Он полагал, что есть пустое пространство и существуют корпускулы, из которых построены тела. Как и у Декарта, все явления сводятся к механическим перемещениям, однако эти перемещения не сводятся к вихрям. *Тела взаимодействуют не только при соударениях, но также и на расстоянии — посредством тяготения*. Установив закон всемирного тяготения, Ньютон, однако, не дал объяснения *причин тяготения* (за что подвергался критике со

стороны картезианцев). Как передается через пустоту взаимодействие тел? В молодости Ньютон склонен был считать, что взаимодействие через пустоту осуществляет Бог. Позднее он приходит к *гипотезе эфира*, которой было суждено сыграть важную роль в истории физической науки. Заканчивая «Математические начала натуральной философии», Ньютон пишет: «Теперь следовало бы кое-что добавить о некоем тончайшем эфире, пронизывающем все тела и в них содержащемся, коего силою частицы тел взаимно притягиваются...» Впрочем, оставаясь верным своим принципам, ученый тут же замечает: «Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны».

И Декарт, и Ньютон принимали во внимание инерцию. Предоставленное самому себе тело должно двигаться прямолинейно и равномерно. В действительности, однако, часто приходится наблюдать криволинейные движения. По Декарту, криволинейное движение объясняется искривлением траектории тела из-за механического препятствия, оказываемого телу другими частями пространства-материи. По Ньютону, искривление траектории происходит вследствие притяжения одного тела другим. В те времена Лондон был центром ньютонианства, а Париж — центром картезианства. Имея это в виду, знаменитый французский писатель и философ *Мари Франсуа Аруэ Вольтер* (1694–1778) писал в своих «Философских письмах» в 1731 году: «Когда француз приезжает в Лондон, то находит здесь большую разницу как в философии, так и во всем другом. В Париже, из которого он приехал, думают, что мир наполнен материей, здесь же ему говорят, что он пуст. В Париже вы видите, что вся Вселенная состоит из вихрей тонкой материи, в Лондоне же вы не видите ничего подобного. Во Франции давление Луны производит приливы и отливы моря, в Англии же говорят, что это само море тяготеет к Луне... Картезианцы говорят, что все совершается вследствие давления, и этого мы не понимаем. Здесь же ньютонианцы говорят, что все совершается вследствие притяжения, которое мы понимаем не лучше...».

3.3 АТОМИСТЫ XVII–XVIII СТОЛЕТИЙ

Как уже отмечалось, Декарт полагал, что материя состоит из «частич» трех типов. Тем самым он выступал с позиций атомизма. Однако позиция его была непоследовательной, поскольку материя отождествлялась с пространством. Картезианцы резко отвергали учения Демокрита и

Эпикура об атомах и пустоте. Последовательным сторонником атомистического учения являлся Ньютон.

Еще ранее, в первой половине XVII столетия это учение поддерживал известный французский философ, математик и астроном *Пьер Гассенди* (1592–1655). Именно Гассенди был первым серьезным критиком теории вихрей Декарта. Атомы у Гассенди представлялись в виде мельчайших физических телец разнообразной формы (круглые, овальные, чечевицеобразные, плоские, конические, крючковидные и даже мохнатые, — в общем, примерно такие же, как две тысячи лет назад у Лукреция). Впервые в науке Гассенди ввел понятие *молекулы*; он рассматривал молекулу как соединение (сцепление) нескольких атомов.

Видным атомистом XVII столетия был известный нидерландский ученый *Христиан Гюйгенс* (1629–1695). Главным свойством атома он полагал бесконечно большую твердость, противостоящую любым попыткам разделить атом на части. Вслед за Гассенди Гюйгенс отвергал декартовские представления о том, что источником движения является Бог. Движение есть *свойство самой материи*, — так считали и Гассенди, и Гюйгенс. Оно проявляется в перемещениях и случайных столкновениях атомов и «само себя сохраняет» (фактически речь идет о признании объективной случайности).

Эти взгляды не разделял другой видный атомист — английский химик и физик *Роберт Бойль* (1627–1691). По Бойлю, мир — это сложный «механизм», который запустил в действие искусный Механик, т. е. Бог. В те времена химия представляла собой не столько науку, сколько своеобразное искусство, занимавшееся превращениями различных веществ. Бойль стремился превратить химию в науку и считал, что в основе этой науки должны лежать принципы атомизма.

Весьма интересны атомистические представления хорватского физика, математика и астронома *Руджера Иосипа Бошковича* (1711–1787). У Бошковича атомы — это не частички вещества, а некие «точки», рассматриваемые как «силовые центры». Эти «центры» распределены в пустоте на разных расстояниях друг от друга. Все «центры» одинаковы; различие свойств веществ объясняется различием во взаимных расположениях «центров», из которых состоят вещества. Сила взаимодействия двух «центров» зависит от расстояния между ними. На очень малых расстояниях действуют мощные силы отталкивания, не позволяющие «центрам» приблизиться друг к другу вплотную. По мере увеличения расстояния между «центрами» силы отталкивания уменьшаются и сменяются силами притяжения, которые сначала растут, но затем уменьшаются, сменяясь силами отталкивания. Отталкивание и притяжение,

таким образом, чередуются. На относительно больших расстояниях действуют только силы притяжения, они постепенно затухают с расстоянием обратно пропорционально квадрату расстояния. Представления Бошковича можно рассматривать как первую попытку ввести в физическую картину мира *силовые поля*. Эти представления оказали впоследствии значительное влияние на взгляды Фарадея.

Убежденным атомистом был *Михаил Васильевич Ломоносов* (1711–1765). Он считал, что вещество состоит из мельчайших частиц — атомов (по Ломоносову, «элементов») и их сочетаний — молекул («корпускул»). Именно Ломоносов был первым, кто стал связывать тепловые явления с движениями корпускул; поэтому он по праву может считаться одним из основоположников *молекулярно-кинетической* теории теплоты. В работе «Размышления о причине тепла и холода» (1747) он решительно выступил против господствовавшей в то время концепции теплорода. Он утверждал, что температура тела определяется вовсе не количеством теплорода в теле, а интенсивностью движения корпускул, составляющих тело. Проведенные исследования привели Ломоносова к выводу, что никакого теплорода *вообще не существует*. В 1760 году в работе «Рассуждение о твердости и жидкости тел» он писал: «Доказано мною, что элементарный огонь аристотельский, или, по новых ученых штилю, теплотворная особливая материя, которая, из тела в тело переходя и странствуя, скитается без всякой малейшей вероятной причины, есть один только вымысел. И купно утверждено, что огонь и теплота состоят в коловратном движении частиц, тела составляющих». Обратим внимание на слова «коловратное движение». Гипотеза вращательного теплового движения молекул понадобилась Ломоносову для объяснения их сильного отталкивания друг от друга при столкновениях. Повидимому, на ученого оказала влияние знакомая ему с детских лет картина отскакивания волчков («кубарей»), пускаемых мальчишками по гладкому льду на замерзшей реке.

3.4 Мир как сложный и точный часовой механизм.

ФИЛОСОФИЯ ДЕИЗМА

Всякое живое существо, всякая тварь — это *механизм*, а Бог-творец есть *искуснейший Механик*. Такие представления начали формироваться еще в XIII–XIV веках. В XVII и особенно в XVIII столетии уже весь мир в целом, вся природа стали уподобляться некоему сложному механизму.

Любой механизм состоит из многих деталей, которые могут быть весьма разнообразными. В качестве мельчайших «деталей» могут рассматриваться, в конечном счете, атомы (корпускулы). Недаром, начиная с XVII столетия, вновь оживает атомистическая концепция, которую в течение многих веков отодвигала на задний план аристотелевская физика. Постепенно формируется новая парадигма: *все явления в мире имеют чисто механическое объяснение*, функционирование всех деталей природного механизма (как относительно крупных, так и мельчайших, в том числе атомов и корпускул) происходит *в соответствии со строгими законами механики*. Надо признать, что формированию этой парадигмы в немалой степени способствовали успехи математики, благодаря им законы механики приобрели достаточно изящную форму.

Период становления механики довольно быстро превратился в период ее расцвета и, более того, период торжества. Механика стала основой мировоззрения. Все, что создал человек, равно как и все, что есть в природе, имеет, считалось, *единую механическую сущность*. «Между машинами, сделанными руками мастеров, и различными телами, созданными природой, — писал Декарт, — я усмотрел только ту разницу, что действия механизмов зависят исключительно от устройства различных трубок, пружин и иного рода деталей, которые всегда настолько велики, что их фигура и движения легко могут наблюдаться, тогда как трубки и пружины, вызывающие действия природных тел, обычно столь малы, что ускользают от наших чувств».

Итак, принципиальной разницы между искусственным и естественным не существует; просто Бог-творец является значительно более искусным механиком, чем человек, его произведения оказываются более тонкими и изощренными. Декарту вторит Лейбниц: «Всякое органическое тело живого существа есть своего рода божественная машина, или естественный автомат, который бесконечно превосходит автоматы искусственные...».

Это была эпоха, когда мир представлялся *единым*. Однако такое единство выступало отнюдь не *диалектически*, а как *единство всеобъемлющей механической системы*. Сделаем маленькую паузу и вспомним название фундаментального труда Норберта Винера: «Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине». Вспомним также, что оппоненты Винера ополчились против него и против кибернетики, *обвиняя ученого в механицизме*. Том самом механицизме, которым «грешили» XVII и XVIII столетия. Однако подобные обвинения неправомерны. Ведь у Винера речь шла вовсе не о единой *механической* сущности машины и

животного, а об их единой *информационной* сущности. И определяет эту единую сущность не Бог, а Случай, или, точнее, вероятностная природа информации.

Многие мыслители эпохи механистического мышления полагали, что *необычайная сложность* мировой механической системы сочетается с ее *исключительно высокой точностью*. Они часто обращались к образу часов. Мир уподоблялся гигантскому *часовому механизму*, сотворенному Богом. В этом «часовом механизме» все целесообразно — как в целом, так и в отдельных его частях. «Это как в редкостных часах, — писал Бойль, — находящихся, например, в Страсбурге, где все искусно слажено. И когда механизм приведен в движение, все происходит в соответствии с первоначальным замыслом Мастера». Считалось, как правило, что природный «часовой механизм» в силу его исключительной сложности не может быть понят во всех его деталях наукой (человеком). Но это, полагали, и не требуется — важно не внутреннее устройство часов, а время, какое они показывают. Активным сторонником такой позиции был Декарт. «Я почти себя удовлетворенным, — писал он, — если объясненные мною причины таковы, что все действия, какие могут из них произойти, окажутся подобными действиям, замечаемым нами в явлениях природы».

Итак, Бог сотворил мировой часовой механизм и запустил его в работу, позаботившись о законах, которым этот механизм должен следовать. А какова дальнейшая роль Бога? На этот счет мнения расходились. Одни полагали, что Бог *непрерывно поддерживает* функционирование созданного им механизма и поэтому оставляет за собой право *корректировать* законы природы. Такой точки зрения придерживался, например, Бойль. Другие полагали, что, запустив мировой часовой механизм в работу, дав ему начальный толчок, Бог в дальнейшем как бы *самоустранился*, так что запущенный им в действие природный механизм функционирует по *объективным законам*, исключаящим «промысел божий». Такая точка зрения (весьма, заметим, распространенная в научных кругах того времени) соответствует философскому учению, согласно которому Бог есть первопричина мира, находящаяся вне его и *не вмешивающаяся в развитие природы и общества*. Указанное философское учение называют *деизмом* (от латинского «деус», что означает «Бог»). Деизм был определенным шагом на пути к *материалистическому миропониманию*. Как заметил Карл Маркс, это был фактически «не более, как удобный и легкий способ отделаться от религии».

Перед тем, как самоустраниться, Бог, создавая мир, заложил в него всю совокупность законов. Возникает вопрос: Как объяснить в таком

случае творящееся в мире зло? В свое время Эпикур отмечал две альтернативы: или Бог не хочет зла, но не может его предотвратить, — и тогда он не всемогущ; или Бог может предотвратить зло, но не хочет этого делать, — и тогда он не милосерден. С точки зрения деиста Лейбница, Бог, создавая мир, желал, чтобы в мире не было зла (Бог желал всеобщего блага), но он не всемогущ, а поэтому сотворил «лучший из всех возможных миров». Иначе говоря, Бог выбрал из всех вариантов, какие только возможны, наиболее хороший; все остальные были бы хуже. Эту мысль Лейбниц выразил в своем сочинении «Теодицея», в котором поставил цель — «оправдать Бога» перед лицом существующего в мире зла, убедить читателя, что все совершается к лучшему (могло быть много хуже). С точки зрения деиста Вольтера, Бог, создавая мир, вовсе не задумывался о том, насколько хорошо будет в этом мире людям. Эту мысль Вольтер выразил в своем сочинении «Кандид», написанном через несколько лет и под впечатлением ужасного Лиссабонского землетрясения 1755 года, унесшего жизни 70 тысяч людей. В связи с этим Вольтер подвергал религию резкой критике. Если у Лейбница Бог-творец не всемогущ, то у Вольтера он не милосерден. Так или иначе, но в обоих случаях Бог оказывается *ненужным* в мире, который уже *существует*.

Философия деизма опиралась на признание только жестких, *однозначных* причинно-следственных связей. Дарованные Богом первичные алгоритмы *однозначно определяют раз и навсегда* все последующее существование и развитие мира. Жесткое понимание причинности является краеугольным камнем в *механической картине мира*. Оно вошло в науку под термином «лапласовский детерминизм», так как именно великий французский ученый *Пьер Симон Лаплас* (1749–1827) наиболее четко сформулировал идейную платформу механицизма. Он писал: *«Мы должны рассматривать современное состояние Вселенной как результат предшествовавшего состояния и причину последующего. Ум, которому были бы известны для каждого момента времени все силы природы и положения всех ее составных частей, если бы вдобавок он оказался достаточно обширным, чтобы подвергнуть эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движения величайших тел Вселенной наравне с движениями легчайших атомов. Не осталось бы ничего, что было бы для него недостоверно, и будущее, так же как и прошедшее, предстало бы перед его взором... Кривая, описанная простою молекулой воздуха или пара, определена так же точно, как и орбиты планет; разницу меж ними определяет только наше незнание»*.

3.5 ЖЕСТКИЙ ДЕТЕРМИНИЗМ ИЛИ ВЕРОЯТНОСТЬ? (РАЗМЫШЛЕНИЯ О ЛАПЛАСЕ)

Читатель. Вот Вы только что привели слова Лапласа. Эти слова уже приводились ранее в книге «Случайность, необходимость, вероятность» в § 1.5, из них можно заключить, что Лаплас был сторонником жесткого детерминизма, считающим фундаментальными однозначные (а вовсе не вероятностные) закономерности. Но одновременно тот же Лаплас говорил, имея в виду теорию вероятностей, что «нет науки, более достойной наших размышлений и результаты которой были бы более полезны». И ведь он не просто говорил, но и всерьез занимался вероятностями. Как уже отмечалось в § 6.1 упомянутой книги, именно Лаплас сформулировал в 1812 году определение вероятности, известное ныне как классическое определение вероятности. В § 11.8 мы познакомились, рассматривая схему Бернулли, с двумя приближенными формулами Лапласа — локальной и интегральной, а в § 12.10 мы познакомились с нормальным распределением Лапласа–Гаусса. Так кем же был Лаплас в науке? Кем его считать — приверженцем жесткого детерминизма или сторонником вероятностных подходов?

Автор. Говоря о тех или иных выдающихся личностях, мы привыкли каждой из них присваивать определенный «ярлык», заносить в тот или иной классификационный раздел. Но это далеко не всегда адекватно характеризует личность, и Лаплас — яркий тому пример. Пьер Симон Лаплас был незаурядной и весьма разносторонней личностью, плодотворно трудившейся сразу в трех областях — астрономии, математике, физике. Он являлся *страстным последователем Исаака Ньютона* и поставил перед собой задачу объяснить на основе ньютоновского закона всемирного тяготения все наблюдавшиеся астрономами явления. Он блестяще объяснил наблюдавшиеся в движениях планет возмущения (например, некоторое возрастание скорости движения Луны по орбите вокруг Земли и скорости движения Юпитера по околосолнечной орбите, а также некоторое замедление движения Сатурна) и показал, что эти возмущения должны, к счастью, иметь периодический характер и не могут привести к разрушению Солнечной системы. Проще говоря, Луна не упадет на Землю, Юпитер не упадет на Солнце, а Сатурн не покинет Солнечной системы. Лаплас создал теорию земных приливов и отливов, рассмотрев совместное влияние Луны и Солнца на водную массу Земли. Им была разработана теория движения спутников Юпитера с учетом притяжения их не только к Юпитеру, но и к Солнцу. Лаплас не

только объяснил многие наблюдавшиеся астрономические явления, но и сделал немало предсказаний, которые впоследствии блестяще подтвердились. Анализируя движение Луны, он предсказал наличие сжатия Земли у полюсов и определил величину этого сжатия. Он предсказал сжатие Сатурна у полюсов и пришел к заключению, что кольцо Сатурна не может быть сплошным (в таком случае оно было бы неустойчивым). Свои астрономические исследования Лаплас изложил в фундаментальном пятитомном труде под названием «Трактат о небесной механике» (1798–1825).

Читатель. Насколько мне известно, Лаплас разработал теорию возникновения Солнечной системы из газовой туманности?

Автор. Согласно его теории, вращающаяся вокруг своей оси газовая туманность должна была сначала принять форму чечевицы, которая со временем разделилась на кольца. Вещество каждого кольца впоследствии собралось в сгусток, образовавший планету. Свою теорию Лаплас рассмотрел в книге «Изложение системы мира», опубликованной в 1796 году.

Читатель. А образование Солнечной системы Лаплас связывал тоже с законом всемирного тяготения?

Автор. Разумеется. Этот закон объяснял и формирование самого Солнца как центрального сгустка туманности, и образование колец, опоясавших Солнце, и формирование планет из вещества колец. «В конце прошлого века, — писал Лаплас, — Ньютон опубликовал свое открытие всемирного тяготения. С тех пор математикам удалось *все известные явления мироздания* свести к этому великому закону природы и, таким образом, достичь в астрономических теориях и таблицах неожиданной точности» (курсив наш. — Л.Т.). Для понимания образа мышления Лапласа важно иметь в виду (подчеркнем это особо!), что, с точки зрения Лапласа, закон всемирного тяготения не только «представляет небесные явления вплоть до самых малых деталей», но и объясняет вплоть до деталей *вообще все физические явления* — вплоть до движений отдельных молекул. Вспомним: «Кривая, описанная простою молекулой воздуха или пара, определена так же точно, как и орбиты планет».

Читатель. Получается, что мировоззрение Лапласа по самой сути своей было воззрением, соответствующим жесткому, однозначному детерминизму?

Автор. Да, таков был образ его мышления. А поддерживался этот детерминизм убежденностью в том, что все в окружающем мире (как на небесах, так и в глубинах вещества) совершается *в соответствии с точными законами механики Ньютона*. Лапласовский детерминизм — это действительно краеугольный камень в механической картине мира.

Читатель. И, по-видимому, тот «ум, которому известны для каждого момента времени все силы природы», был для Лапласа Богом-творцом?

Автор. Я бы так не стал утверждать. Известно, что особой религиозностью Лаплас не отличался (хотя и готовился в молодости к карьере священника). Одни считают Лапласа атеистом, другие полагают, что он был деистом. В конечном счете, это не столь важно. Гораздо важнее тот ответ, который Лаплас дал Наполеону, когда император, познакомившись с лапласовской теорией возникновения Солнечной системы, попытался выяснить мнение ученого о роли и месте Бога в этом процессе. Лаплас ответил: *«Я не нуждался в этой гипотезе»*. Так что вряд ли, говоря об «уме, которому известны для каждого момента времени все силы природы», Лаплас имел в виду Бога. Тут уместно представить себе некий гипотетический ум — тот самый, который через полстолетия после кончины Лапласа явится в облике «демона Максвелла», владеющего информацией, достаточной для того, чтобы противостоять возрастанию энтропии в деградирующей со временем действительности.

Читатель. Казалось бы, отрицая созидающую роль Бога, Лаплас должен был утверждать созидающую роль Случая. Но тогда его нельзя считать приверженцем жесткого детерминизма.

Автор. Нет, Лаплас не верил в созидающую роль Случая.

Читатель. А как связать это с его трудами по теории вероятностей, с его огромным интересом к вероятности, роль которой в жизни общества он настойчиво подчеркивал?

Автор. Вот тут мы подошли к довольно тонкому моменту. Лаплас действительно много сделал для развития теории вероятностей. Он оставил нам двухтомную «Аналитическую теорию вероятностей», издававшуюся при жизни автора трижды: в 1812, 1814 и 1820 годах. Отдельно отметим работу Лапласа «Опыт философии теории вероятностей» (1814). Лаплас полагал, что *нормальный закон распределения для случайных величин столь же универсален и важен, как и закон всемирного тяготения*. Разрабатывая теорию ошибок наблюдений, он обратил внимание на то, что случайные ошибки распределяются по нормальному закону во всех случаях, когда они (ошибки) обусловлены большим количеством независимо действующих причин. Позднее, в 80-х годах XIX столетия, Чебышев развил эту идею и доказал важную предельную теорему теории вероятностей, которая была уже в общем виде доказана в 1901 году Ляпуновым и известна ныне как центральная предельная теорема. Напомним ее: Если данная случайная величина есть сумма большого числа взаимно независимых случайных величин, влияние каждой из которых на всю сумму ничтожно мало, то данная случайная величина имеет распределение, близкое к нормальному.

Читатель. Но как связать все это с лапласовским детерминизмом?

Автор. Все дело в том, что Лаплас рассматривал вероятность как понятие, относящееся не к *объективной*, а к *субъективной* случайности, т. е. случайности, связанной не с самой природой явлений, а лишь со степенью нашего понимания этих явлений. Когда он говорил, что траектория молекул определена столь же точно, как и орбиты планет, то делал важную оговорку: *«разницу между ними определяет только наше незнание»*. Итак, в самой природе властвует, по Лапласу, жесткая необходимость, определяемая строгими законами, главный из которых — закон всемирного тяготения. А вот процесс познания природы в силу неполноты наших знаний и неизбежных ошибок наблюдений требует обращения к теории вероятностей и прежде всего к нормальному закону распределения.

Читатель. Выходит, что, рассматривая саму природу, Лаплас *абсолютизировал закон всемирного тяготения*, а рассматривая процесс познания окружающего мира, он *абсолютизировал нормальный закон распределения для случайных величин*?

Автор. Весьма точное замечание. Как известно, всякая абсолютизация бесполезна. Абсолютизируя законы механики Ньютона, Лаплас тем самым «зажимал» природу в рамках механической картины мира. Абсолютизируя же нормальное распределение, он произвольно и неправомерно расширял область применимости теории вероятностей и тем самым снижал ее научную значимость. В книге *Л.Е. Майстрова «Развитие понятия вероятности»* (М.: «Наука», 1980) можно прочитать:

«Нормальный закон распределения представлял собой одну из первых строго обоснованных закономерностей теории вероятностей; однако абсолютизация Лапласом этого закона была неверной. Другая ошибка Лапласа состояла в том, что, считая историю человеческого общества областью, в которой всецело господствует слепой случай, он предполагал, что теория вероятностей является той наукой, которая исчерпывающе объясняет эту историю. Он считал, что с помощью теории вероятностей можно проанализировать все общественные явления. Исходя из этого, Лаплас, подобно другим математикам XVIII века, пытался применить теорию вероятностей к судебным процессам, к решениям собраний и т. п. Такое необоснованное и ошибочное распространение теории вероятностей имело отрицательное влияние на развитие науки».

Читатель. Надо ли понимать, что Лаплас подсчитывал вероятности, скажем, верности свидетельских показаний и справедливости судебных приговоров?

Автор. Да, именно такими подсчетами, в частности, Лаплас пробовал заниматься, когда был назначен Наполеоном на должность мини-

стра внутренних дел. Тут он успеха не имел и пробыл на этой должности всего месяц.

Читатель. Поистине многогранная личность! И как много удалось ему сделать в своей жизни, несмотря на то, что он имел склонность к абсолютизации идей!

Автор. Почему «несмотря»? А может быть как раз «благодаря»? Лаплас во всей широте выразил тот этап познания мира, который принято называть механической картиной мира, и немало сделал для грядущего радикального изменения (лучше сказать, углубления) этой картины. Можно сказать, что именно на будущую картину мира «работала» так активно развиваемая Лапласом теория вероятностей. Но об этом, увы, ему не дано было знать. Здесь в самый раз напомнить предсмертную фразу великого ученого: «То, что мы знаем, так ничтожно в сравнении с тем, чего мы не знаем».

3.6 ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ МИРА

Формирование механической картины мира потребовало нескольких столетий. Начавшись в XVII столетии, оно практически завершилось *лишь к середине XIX столетия*. Эту картину надо рассматривать как важную ступень в познании человеком окружающего мира. Каким представлялся этот мир? Все тела (твердые, жидкие, газообразные) состоят из атомов и молекул, находящихся в никогда не прекращающемся тепловом движении. Взаимодействие тел происходит как *при их непосредственном контакте* (силы упругости и силы трения), так и *на расстоянии* (силы тяготения). Все пространство заполнено всепроникающим эфиром. Атомы воспринимаются как некие цельные, неделимые «кирпичики» вещества; сцепляясь друг с другом, они образуют молекулы и, в конечном счете, все тела. Природа этого «сцепления», по сути дела, не исследуется; предполагается чисто механическое сцепление. Нет понимания сущности эфира, поэтому создаются его разнообразные модели: абсолютно несжимаемый эфир, эфир, твердый для быстрых изменений, но текучий для медленных, эфир, состоящий из мельчайших «шестеренок», «волчков» и т. д.

Говоря о механической картине мира, выделим четыре принципиальных момента. Во-первых, мир в этой картине строится на едином фундаменте — на *законах механики Ньютона*. Все наблюдаемые в природе превращения, а также тепловые явления *сводятся на уровне микроявлений к*

механике атомов и молекул — их перемещениям, столкновениям, сцеплениям, разъединениям. Открытие в середине XIX века закона сохранения и превращения энергии рассматривается как окончательное доказательство *механического единства мира* (поскольку все виды энергии можно теперь «свести» к энергии механического движения). Короче говоря, весь мир — это гигантская Машина, построенная по законам механики и по этим же законам функционирующая.

Правда, во второй половине XVIII века и особенно в XIX веке развернулись исследования электрических и магнитных явлений. Однако поначалу они, как казалось, не подрывали, а всего лишь усложняли, дополняли механическую картину мира. Именно под таким углом зрения рассматривалось, например, внешнее сходство закона Кулона с законом всемирного тяготения (с точностью до замены точечных масс на точечные электрические заряды).

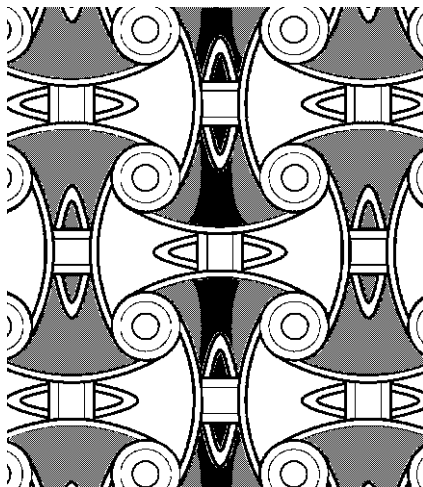
Во-вторых, механическая картина мира исходит из предположения, что *микромир подобен макромиру*. Была достаточно хорошо исследована механика макромира; считалось, что *точно такая же механика описывает движения атомов и молекул*. Как движутся и сталкиваются обычные тела, точно так же движутся и сталкиваются атомы. Именно поэтому Лаплас утверждал, что «кривая, описанная простою молекулой, определена так же точно, как и орбиты планет». С точки зрения механической картины мира, считается, что как неживая, так и живая материя «сконструирована» из одних и тех же «механических деталей», различающихся, по сути дела, лишь размерами.

В-третьих, в механической картине мира *отсутствует развитие* — мир неизменен, он в целом таков, каким он был всегда. Фридрих Энгельс подчеркивал, что для рассматриваемой эпохи механицизма была характерна «выработка своеобразного общего мировоззрения, центром которого является представление об *абсолютной неизменяемости природы*». Ведь все наблюдаемые явления, все кажущиеся превращения — это не более, как механические перемещения и столкновения атомов и молекул. Образно говоря, все происходящее в мире есть не более как исправное функционирование умело сконструированного природного механизма. Неудивительно, что в биологии XVIII столетия господствовала концепция *преформизма*, согласно которой в яйцеклетке любого живого существа уже содержится в миниатюре будущий взрослый организм; в зародыше заключены свои, более миниатюрные зародыши — и так до бесконечности. Механическая картина мира фактически отвергает *качественные* изменения, сводя все к изменениям исключительно *количественным*. В этом и усматривался залог неизменности природы.

В-четвертых, в механической картине мира все причинно-следственные связи — *однозначные*, выражаемые *динамическими закономерностями*. Здесь господствует лапласовский детерминизм. Мир функционирует с точностью и предопределенностью отлаженного часового механизма. Использование вероятностей в естественных науках связано с нашим незнанием всех деталей сложного механизма природы. *За этими вероятностями скрываются однозначные закономерности.*

Таковы основные черты механической картины мира — парадигмы, господствовавшей в естествознании на протяжении нескольких столетий — вплоть до второй половины XIX столетия. По самой своей сути эта картина мира являлась *метафизической* — в ней отсутствовали внутренние противоречия, все происходящее в мире представлялось жестко предопределенным, все многообразие мира сводилось к механике.

Пройдет время и станет ясно, что во всех четырех отмеченных выше принципиальных моментах механическая картина мира (его механистическая модель) *несостоятельна*, она неадекватно описывает действительность. Выяснится, что закономерности окружающего мира не сводятся к законам ньютоновской механики, а значительно сложнее и богаче. Выяснится также, что микромир вовсе не подобен макромиру, а объясняется иными закономерностями. Уместно напомнить, что об этом догадывался в свое время Лукреций и именно из этой догадки выводил заключение о необходимости существования атомов (см. § 4.5). Выяснится далее, что в природе качественные изменения не только возможны, но, более того, являются необходимым условием ее развития, и именно в этом заключается «незыблемость» природы. Наконец, выяснится, что лапласовский детерминизм — не более чем идеализация природных связей, и что метафизическое исключение из картины природы случайности с одновременной абсолютизацией необходимости соответствует весьма упрощенному рассмотрению естественнонаучной картины мира. Однако чтобы все это выяснилось, должен был сначала состояться XIX век и должна была сформироваться электромагнитная картина мира.



ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАРТИНЫ МИРА В ДЕВЯТНАДЦАТОМ СТОЛЕТИИ: ОТ ФЛЮИДОВ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ПОЛЮ

...У нас когда-то были потоки крючочков, летающих вокруг магнитов, но нет ничего более ясного, чем Ваше описание. Мне кажется, что Вы ясно видите, как силовые линии огибают препятствия, гонят всплески напряжения в проводниках, сворачивают вдоль определенных направлений в кристаллах и несут с собой все то же самое количество способности к притяжению, распределенной разреженнее или гуще в зависимости от того, расширяются эти линии или сжимаются.

Из письма Максвелла к Фарадею (1857)

В физике появилось новое понятие, самое важное достижение со времени Ньютона — поле. Потребовалось большое научное

воображение, чтобы уяснить себе, что не заряды и не частицы, а поле в пространстве между зарядами и частицами существенно для описания физических явлений.

Альберт Эйнштейн

4.1 НАЧАЛО ВЕКА: ИЗОБИЛИЕ ФАКТОВ И ДОМЫСЛОВ

К началу XIX века физика уже представляла собой вполне развитую самостоятельную науку, накопившую огромный *эмпирический материал*, который предстояло систематизировать, обобщить, осмыслить. «Она вступила в новый век, — писал *Я.Г. Дорфман* в своей книге «Всемирная история физики: с начала XIX до середины XX веков» (М.: «Наука», 1979), — будучи как бы наскоро сколоченной из различных учений, одни из которых возникли еще в давние времена и явно устарели, другие были созданы сравнительно недавно, но по старым трафаретам. Ньютоновский феноменологический метод считался основным и общепризнанным. Механика, вооруженная методами математического анализа, была превращена в мощное орудие исследования. Физический эксперимент стал по преимуществу количественным, измерительным и достиг высокой точности во многих отраслях, опираясь на быстро развивающееся, хотя все еще кустарное приборостроение».

В те времена на первом плане была задача *измерения*, накопления эмпирических данных, фактов. Измерения проводились практически во всех областях физического знания; измерялись механические, гидродинамические, тепловые, оптические, электрические величины. Изобретались и совершенствовались разнообразные *физические приборы и устройства*.

Чтобы дать некоторое представление о масштабах развернувшегося физического творчества, приведем далеко не полный перечень изобретений, сделанных в XVIII веке: газовый термометр *Г. Амонтона* (1703), термометры *Г. Фаренгейта* (1709), *Р. Реомюра* (1730), *А. Цельсия* (1742), стеклянная электрическая машина *Ф. Гауксби* (1706), электроскопы *Ж. Нолле* (1747), *А. Вольты* (1782), *А. Беннета* (1786), первый электрический конденсатор (лейденская банка) *Э. Клейста* и *П. Мушенбрука* (1745), электрометр *Д. Эликота* (1746), молниеотвод *Б. Франклина* (1750), калориметры *Д. Блэка* (1762) и *А. Лавуазье* и *П. Лапласа* (1780), электрофор *А. Вольты* (1775), гигрометр *Д. Делюка* (1781), фотометр *П. Бугера* (1740), дифракционная решетка *Д. Риттенгауса* (1786), первый источник постоянного электрического тока («вольтов столб») (1800).

Физика на рубеже XVIII–XIX веков — это достигшая высокого совершенства аналитическая механика плюс богатейший эмпирический материал.

Этот материал позволил сделать ряд верных заключений, однако в основном он еще не получил должного осмысления. Факты рассматривались *porozнь*, им часто давалось *надуманное толкование*. Широко использовались представления о разных *флюидах*, невесомых «жидкостях», субстанциях. С их помощью пытались объяснить те или иные наблюдаемые факты.

Электрические и магнитные явления рассматривались независимо друг от друга. С магнитными явлениями связывали наличие в телах (в магнитах) двух разнородных магнитных «жидкостей», одна из которых якобы накапливалась у северного полюса магнита, а другая — у южного. Электрические явления также объясняли существованием двух особых «жидкостей». Считалось, что если в теле имеется одинаковое количество той и другой «жидкости», то происходит их взаимная компенсация, такое тело электронеutrально. Преобладание в теле той или иной «жидкости» делает его заряженным; знак заряда зависит от того, какой именно вид электрической «жидкости» преобладает.

Американский ученый и государственный деятель *Бенджамин Франклин* (1706–1790) исходил из существования одной электрической «жидкости». Он полагал, что тело наэлектризовано либо потому, что имеет избыток этой «жидкости», либо, напротив, недостаток. В первом случае оно заряжено положительно, а во втором — отрицательно. По мере накопления эмпирического материала вопрос о том, что такое электричество, начал быстро усложняться. В дополнение к известному Франклину электричеству, получающемуся при трении (это электричество стали называть «статическим», или «обыкновенным»), рассматривали, начиная с 80-х годов XVIII века, так называемое «животное» электричество, а в самом конце века появилось еще и «вольтовое» электричество. О «животном» электричестве заговорили после знаменитых экспериментов итальянского анатома и физиолога *Луиджи Гальвани* (1737–1798) с лягушками, фактически положившие начало электрофизиологии. «Вольтовое» электричество вошло в науку после изобретения итальянским физиком и физиологом *Алессандро Вольтой* (1745–1827) первого источника тока — первого в мире гальванического элемента. Умножение видов электричества продолжалось и в первой половине XIX века: появилось «термоэлектричество», а затем «магнитоэлектричество».

В области тепловых явлений в XVIII — первой половине XIX века господствовала идея, утверждающая существование особой тепловой

«жидкости», называемой *теплородом*. Высказанная Ломоносовым критика теплорода долгое время не находила понимания; по-прежнему полагали, что степень нагретости тела определяется количеством содержащегося в нем теплорода. Отметим также флюид, «отвечавший» за оптические явления; световое излучение рассматривалось как процесс распространения этого флюида по пространству. Наконец, в живых организмах предполагалось наличие особого флюида, называемого *жизненной силой*.

Итак, естествознание вступило в XIX век с *огромным багажом накопленных фактов и целым рядом домыслов о природе этих фактов*. Данную ситуацию следующим образом охарактеризовал известный российский писатель и философ *Александр Иванович Герцен* (1812–1870) в своих «Письмах об изучении природы», написанных в 1845 году: «Положительные науки имеют свои маленькие привиденьица: это — силы, отвлеченные от действий, свойства, принятые за самый предмет, и вообще разные кумиры, сотворенные из всякого понятия, которое еще не понято. Например, жизненная сила, эфир, теплород, электрическая материя и проч.» Все эти придуманные флюиды («привиденьица») создавали лишь *видимость понимания*. Кроме того, они как бы подчеркивали разрозненность рассматриваемых явлений, их *обособленность друг от друга*. «Возведением их в ранг субстанций, — отмечал известный французский ученый *Жюль Анри Пуанкаре* (1854–1912), — утверждалась их индивидуальность; они становились как бы разделенными друг от друга глубокой пропастью. Эту пропасть потребовалось засыпать, когда стало живее чувствоваться единство природы, когда были замечены тесные внутренние связи между всеми ее частями. Прежние физики размножением своих «жидкостей» не только создавали ненужные субстанции, но и разрывали реальные связи».

Осознание этих связей как раз и явилось одним из главных достижений науки XIX столетия.

4.2 РАСКОЛ МЕЖДУ ФИЛОСОФИЕЙ И ЕСТЕСТВОЗНАНИЕМ

Осмысление быстро накапливавшихся научных фактов нуждалось, казалось бы, в совместных действиях естествоиспытателей и философов. Однако со второй половины XVIII века обнаружилось резкое *расхождение между философией и естествознанием*. Философия, возглавляемая известными немецкими философами *Иоганном Готлибом Фихте*

(1762–1814), *Фридрихом Вильгельмом Шеллингом* (1775–1854), *Георгом Вильгельмом Фридрихом Гегелем* (1770–1831), квалифицировала накопление экспериментальных данных как «малые дела»; себе же она отводила роль подлинного добывателя истины. Раскол между философией и естествознанием особенно углубился в XIX веке. «Философия прорицала тайны с какой-то недостижимой высоты, — писал Герцен, — а естествознание смиренно покорялось опыту и не шло далее. Друг к другу они питали неприязнь; они выросли во взаимном недоверии. Много предрассудков укоренилось с той и другой стороны. Столько горьких слов пало, что при всем желании они не могут примириться до сих пор». (Заметим, что это написано в 1845 году).

В чем же дело? Ведь в античные времена естествознание и философия составляли единое целое. Что же произошло теперь? То, что произошло, может быть названо болезнью роста. Как отмечал академик *Сергей Иванович Вавилов* (1891–1951), «с начала великого расцвета естествознания в XVI–XVII веках, по мере постепенного усложнения и обособления отдельных наук, физики все больше и больше стали отдаляться от философских задач и даже стали культивировать пренебрежительное отношение к философии как схоластической, ненужной области знания. Грибоедовское «пофилософствуй — ум вскружится» стало лозунгом для очень многих физиков и вообще естествоиспытателей».

Здесь важно отметить, что в XVII, а затем в XVIII и XIX веках в науке укрепился и широко применялся *аналитический подход*. Он был весьма полезен; без него не произошло бы столь мощное накопление эмпирических данных. В то же время такой подход страдал склонностью возводить получаемые данные в догматы, *разрывать* и *абсолютизировать* их, рассматривать как истину в *окончательном виде*. Как подчеркивал *Фридрих Энгельс*, этот подход «оставил нам привычку рассматривать вещи и процессы природы в их обособленности, вне их великой общей связи, а потому не в движении, не в развитии, а в неподвижном состоянии, не как существенно изменчивые, а как вечно неизменные, не живыми, а мертвыми. Перенесенный Бэконом и Локком из естествознания в философию, этот способ понимания создал специфическую ограниченность последних столетий — *метафизический метод мышления*» (курсив наш. — Л.Т.).

Надо признать, к чести немецких философов XVIII века (в особенности Шеллинга и Гегеля), что они противопоставили метафизическому методу мышления принципиально иной метод — тот самый, который ныне принято называть диалектическим и который корнями уходит в античную философию. В своих работах Шеллинг утверждал суще-

ствование *взаимосвязи* различных явлений природы и, как следствие, существование *общих принципов*. Последующее развитие событий в научном мире XIX века подтвердило верность такой точки зрения. Шеллинг выдвинул концепцию полярных противоположностей и их единства в философском плане; эта концепция в какой-то мере предвосхитила гегелевскую диалектику.

Георг Гегель по праву считается основоположником диалектического метода мышления. Он утверждал, что «диалектика есть душа всякого научного познания». Центральным понятием в его теории является понятие *развития*. Гегель сформулировал основные законы развития: *закон единства и борьбы противоположностей, закон перехода количественных изменений в качественные, закон отрицания отрицания*. О первом из этих законов мы уже говорили — см. § 1.6. Второй закон утверждает, что по достижении определенной пороговой величины (т. н. границы меры) количественные изменения объекта приводят к перестройке его структуры, в результате чего возникает *качественно новая* система. Согласно третьему закону, развитие осуществляется *циклами*, каждый из которых имеет три стадии: исходное состояние объекта, его превращение в свою противоположность (отрицание), превращение этой противоположности в свою противоположность (отрицание отрицания). Говорят, что развитие происходит как бы *по спирали*: через отрицание отрицания совершается возвращение назад, но уже на новом «витке спирали», т. е. *на более высоком уровне*. Законы гегелевской диалектики, берущие начало в диалектике античных философов, сыграли исключительно важную роль в формировании современной естественнонаучной картины мира.

НЕЗАПЛАНИРОВАННЫЙ ДИАЛОГ

Читатель. Насколько же мощнее был бы прогресс науки в XVIII–XIX веках, если бы вместо раскола существовал союз физиков и философов в рамках единой науки — натурфилософии!

Автор. Все далеко не так просто. Чтобы развиваться, физика должна была пройти период *накопления фактов*, исследовать многие стороны реальности *по отдельности*. Не слишком задумываясь о глубинной сущности явлений и довольствуясь придуманными флюидами, физики *добывали факты и факты*, создавая тем самым условия для перехода количества в качество. Философы же, отстраняясь от фактов, *оттачивали диалектику мышления*.

Читатель. Но это была *идеалистическая диалектика*! Она исходила из первичности не материи, а сознания.

Автор. Это верно. По Гегелю, «сущее есть разум», фундаментальную природу реальности составляют Идея, Разум, Бог, «актуализацией которых является дух». Тем не менее ценность диалектического метода от этого не умаялась.

Читатель. Как я понимаю, в развитии науки XIX столетия определились два в достаточной мере самостоятельных направления: с одной стороны, *метафизический материализм физиков*, а с другой, *диалектический идеализм философов*.

Автор. Действительно, наблюдалась довольно четкая расстановка сил. Возможно, в этом был глубокий смысл, залог перехода в дальнейшем к *диалектическому материализму*. Метафизическое «омертвление» действительности в ходе ее аналитического исследования — необходимый предварительный этап на пути к пониманию диалектика природы.

Читатель. Не думал я, что разрыв между физикой и философией может быть полезен.

Автор. Разумеется, не все столь однозначно. Попробуем, например, оценить позицию немецкого физика *Иоганна Кристиана Поггендорфа* (1796–1877), который в те годы был главным редактором весьма солидного и влиятельного физического научного журнала. Поггендорф крайне бдительно следил за «чистотой стиля» журнала и категорически отказывался публиковать работы, где содержалась хоть какая-то философия. Признавались только эмпирические факты, а любые обобщения и гипотезы отвергались. Правильно ли это было?

Читатель. Наверное, правильно, поскольку ограждало читателей от различного рода псевдонаучных домыслов.

Автор. Но в то же время это обедняло журнал, возводило барьер перед неординарными работами, в которых предпринимались попытки осмыслить накопленные факты. Так, гениальная работа *Роберта Майера*, открывшего закон сохранения и превращения энергии, пролежала в редакции журнала до самой смерти его главного редактора. Не поэтому ли великий закон пришлось самостоятельно переоткрывать *Джоулю*? Так что воздержимся от категорических заключений. Тем более не будем гадать о том, как развивались бы события, если бы у физиков и философов XIX века было поменьше взаимной неприязни. *Союзу естествознания и философии еще только предстояло родиться*. Необходимым предварительным шагом на пути к этому союзу был начавшийся в XIX столетии процесс *интеграции* разрозненных дотоле научных направлений. Одним из важнейших достижений надо считать *синтез классической электродинамики*, о чем позднее мы поговорим достаточно подробно.

4.3 МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВЕТОНОСНОГО ЭФИРА; КРИЗИС ЭТОЙ МОДЕЛИ

Что такое *свет*? Какова его природа? В поэме Лукреция «О природе вещей» световые лучи рассматривались как поток мелких частиц, летящих в разные стороны от светящихся или освещенных тел. Об этом Лукреций говорил так:

От вещей всевозможных, какие мы видим,
Необходимо должны истекать и лететь, рассыпаясь,
Тельца, которые бьют по глазам, вызывая в них зрение.

Затем прошло более шестнадцати столетий, в течение которых никто, похоже, не интересовался природой света. Интерес к ней возродился в XVII столетии. И тогда же обозначились две различных концепции — концепция *истечения световых корпускул* и концепция *упругого эфира*, в котором распространяются *световые волны* (или «*световые импульсы*»). Сторонником первой концепции был *Исаак Ньютон*. Во главе сторонников второй концепции находились известный английский естествоиспытатель и архитектор *Роберт Гук* (1635–1703) (тот самый, который впервые установил клеточное строение органической материи и ввел в обиход термин «клетка») и не менее известный нидерландский физик, оптик, астроном, математик *Христиан Гюйгенс* (1629–1695). Обе концепции (и корпускулярная, и волновая) являлись *механистическими*. Вполне понятно, что большие успехи механики XVII века инициировали именно механистический подход к оптическим явлениям.

Любопытно, что ньютоновские световые корпускулы не *обладали осевой симметрией*; они имели четыре разные «стороны». Именно этим, полагал Ньютон, можно объяснить результаты опытов Гюйгенса по двойному лучепреломлению в двух последовательно расположенных кристаллах исландского шпата. В этих опытах наблюдалось различное поведение во втором кристалле *обыкновенного* и *необыкновенного* лучей, образовавшихся в результате расщепления исходного светового луча при его прохождении сквозь первый кристалл (напомним, что «обыкновенным» называют луч, подчиняющийся известному закону преломления, а «необыкновенным» — не подчиняющийся). Результаты опытов Гюйгенса зависели от *взаимной ориентации кристаллов*. В одних случаях каждый из лучей снова расщеплялся (проходя через второй кристалл) на два луча. В других случаях нового расщепления лучей не происходило; при этом вышедший из первого кристалла обыкновенный луч либо оставался во втором кристалле обыкновенным лучом, либо (при иной

ориентации кристаллов) вел себя как необыкновенный луч. Объясняя опыты Гюйгенса, Ньютон отмечал: «Не существует двух сортов лучей, отличающихся по своей природе один от другого, так что один при всех положениях преломляется обыкновенным способом, другой же во всех положениях — необыкновенным способом. Различие между двумя сортами лучей в опыте Гюйгенса было только в положениях сторон лучей относительно плоскостей перпендикулярного преломления. Ибо один и тот же луч преломляется иногда обыкновенно, а иногда необыкновенно — *сообразно положению его сторон относительно кристалла*» (курсив наш. — Л.Т.). Здесь содержалось в неявном виде открытие *поляризации света*. Различным «положениям сторон» ньютоновских световых корпускул в современной оптике соответствуют различные ориентации плоскости поляризации плоскополяризованного света, рассматриваемые относительно плоскости, проходящей через оптическую ось кристалла и направление светового луча.

Заметим, что Ньютон, сознавая сложность природы света, пытался ввести в свою корпускулярную модель элементы волнового движения. Он понимал, что чисто корпускулярная теория не объяснит *интерференционные кольца*, которые сам же Ньютон наблюдал при прохождении света через воздушный промежуток между сферической поверхностью линзы и плоскостью стекла, подложенного под линзу (хорошо известные «кольца Ньютона»). Ньютон допускал, что существуют и световые корпускулы, и светоносный эфир. Двигаясь сквозь эфир, корпускулы возбуждают «эфирные волны», которые распространяются в пространстве значительно быстрее самих корпускул. Волны приводят к попеременным сжатиям и разрежениям эфира. Попадая в область сжатого эфира, световая корпускула «испытывает приступ легкого отражения», попадая же в разреженную область, она «испытывает приступ легкого прохождения».

Обратим внимание на то, что во времена Ньютона уже было известно, что свет распространяется не мгновенно, а с конечной скоростью. Наблюдая в 1675 году за спутниками Юпитера, датский астроном *Оле Реммер* (1644–1710) впервые установил, что свет распространяется со скоростью около 300 000 км/с.

Свои взгляды на природу света Христиан Гюйгенс изложил в книге «Трактат о свете», вышедшей в 1690 году. По Гюйгенсу, распространение света — это *передача импульсов возбуждения* («сотрясений») по заполняющему все пространство упругому эфиру — от одних частиц эфира к другим. Гюйгенс писал: «Если некоторое число одинаковых шаров, сделанных из твердого вещества, расположить по прямой линии так,

чтобы они соприкасались, то при ударе такого же шара в крайний движение передается почти мгновенно последнему шару и тот отскакивает, тогда как остальные шары остаются неподвижными, также как и тот, что ударил». Шары, о которых здесь идет речь, Гюйгенс сопоставлял с частицами эфира. Он подчеркивал, что распространение импульса светового возбуждения «заключается не в переносе самих частиц, а только в небольшом сотрясении, в передаче которого окружающим частицам они не могут мешать друг другу». Последнее обстоятельство объясняет, по Гюйгенсу, независимость распространения взаимно пересекающихся световых пучков.

Хотя при описании распространения света в упругом эфире Гюйгенс пользовался термином «волна», однако, строго говоря, световые волны он не рассматривал, а рассматривал распространение в пространстве *волнового фронта* (поверхности, до которой дойдет световое возбуждение от данного точечного источника за некоторый промежуток времени). Несмотря на известную ограниченность, такой подход позволил ему получить ряд важных результатов и прежде всего знаменитый *волновой принцип Гюйгенса*. Известный английский физик *Уильям Генри Брэгг* (1862–1942) назвал учение Гюйгенса о свете «теорией импульсов, предвосхитившей современную волновую теорию».

Давнее соперничество сторонников корпускулярной и волновой концепций завершилось в первой половине XIX столетия, казалось бы, неоспоримой и окончательной победой сторонников волновой концепции. Решающую роль в этом сыграли исследования известного английского ученого *Томаса Юнга* (1773–1829) и известного французского физика *Огюстена Жана Френеля* (1788–1827), заложивших основы *волновой оптики*. Юнг открыл явление *интерференции* и воспользовался им для объяснения цвета тонких пленок, цвета побежалости на металлических поверхностях, возникновения колец Ньютона, и ряда других явлений. Свои результаты он опубликовал в работах, вышедших в свет в первом десятилетии XIX века. Блестящие опыты Юнга поражали воображение современников. Об этом красноречиво говорит известное восклицание видного французского ученого и политического деятеля *Доминика Франсуа Араго* (1786–1853): «Кто бы мог подумать, что свет, слагаясь со светом, может вызвать мрак!»

Огюстен Френель уточнил волновой принцип Гюйгенса, дополнив его принципом интерференции Юнга; так появился широко используемый в оптике «принцип Гюйгенса — Френеля». На основе этого принципа Френель обстоятельно исследовал *дифракцию света*, рассматривая ее как результат интерференции вторичных световых волн. Если Юнг

первым выдвинул идею интерференции света, то Френелю мы обязаны ее математическим обоснованием, которое тот изложил в своем «Мемуаре о дифракции света» (1819).

Впрочем, торжество концепции световых волн в упругом эфире оказывалось не совсем полным. Здесь надо вернуться к проблеме *поляризации световых волн*. Выдвинутая Ньютоном на основе опытов Гюйгенса идея поляризации света оставалась без внимания около ста лет. В 1808 году Парижская академия наук объявила конкурс на лучшую математическую теорию двойного преломления света. Премию получила работа французского физика *Этьена Луи Малюса* (1775–1812), в которой было показано, что солнечный свет, отраженный от поверхности воды под углом 53° , обладает тем же свойством, что и свет, прошедший сквозь кристалл исландского шпата. Для объяснения своего открытия и явления двойного преломления Малюс воспользовался корпускулярной концепцией Ньютона и его гипотезой о существовании у световых корпускул четырех разных «сторон». В солнечном свете корпускулы ориентированы беспорядочно, тогда как при прохождении сквозь кристалл или при соответствующем отражении они определенным образом ориентируются. Световой луч, корпускулы которого обладают определенной ориентацией, Малюс назвал *поляризованным*. С этого времени термин «поляризация света» вошел в оптику. Исследования Малюса по поляризации света продолжил английский физик *Дейвид Брюстер* (1781–1868).

В 1816 году Огюстен Френель и Доминик Араго выполнили совместно опыты по *интерференции поляризованных световых пучков*. Они установили, что выходящие из кристалла исландского шпата обыкновенный и необыкновенный лучи не интерферируют друг с другом. После ряда опытов, в которых варьировалась поляризация световых пучков, ученые пришли к заключению, что *световые волны поперечны*. Это означало, что колебания частиц эфира совершаются *перпендикулярно к направлению распространения световой волны*. Отсюда следовало, что упругий эфир «работает» только на сдвиг. Опыты показали также, что световые волны ни в какой мере, даже частично, не являются продольными (не содержат продольной составляющей), т. е. упругий эфир не может сжиматься. Все это не укладывалось в сознание. Практически невозможно представить себе твердый (работающий на сдвиг) и в то же время совершенно несжимаемый эфир, обладающий к тому же чрезвычайно ничтожной плотностью, позволяющей ему проникать всюду. Таким образом, исследования, приведшие в первой половине XIX столетия к возникновению волновой оптики, привели также к *кризису механи-*

ческой модели эфира. Такая модель представлялась явно нереалистичной. Эпоха «механистической оптики» завершалась.

Все чаще ученые стали высказывать мысль о возможной связи оптических явлений с электрическими и магнитными. На эту возможность указывали еще *Михаил Ломоносов* и *Леонард Эйлер* в середине XVIII столетия. Догадывался об этом также *Томас Юнг*. Первые экспериментальные подтверждения верности подобных догадок были получены в середине XIX столетия.

4.4 КОНЦЕПЦИИ БЛИЗКОДЕЙСТВИЯ И ДЕЙСТВИЯ НА РАССТОЯНИИ

Предположим, что некоторое воздействие передается от объекта *A* к находящемуся на некотором удалении от него объекту *B* (или от объекта *B* к объекту *A*). Возможны две принципиально разных концепции передачи воздействия. Одна концепция исходит из того, что воздействие от *A* к *B* (или от *B* к *A*), во-первых, передается *непосредственно*, без каких-либо посредников, через пустоту, и во-вторых, передается *мгновенно*, с бесконечной скоростью, сразу. Эту концепцию называют концепцией *действия на расстоянии* (или, иначе, концепцией *дальнодействия*). Другая концепция исходит из того, что воздействие от *A* к *B* (или от *B* к *A*), во-первых, передается постепенно вдоль линии *AB*, через *какие-то промежуточные «звенья»*, и во-вторых, передается не мгновенно, а с некоторой *конечной скоростью*. Эту концепцию называют концепцией *близкодействия*.

В предыдущем параграфе мы говорили о свете как о волнах, которые распространяются по упругому эфиру. Понятно, что такие оптические представления физиков XIX века соответствовали концепции близкодействия (световой сигнал от *A* к *B* передается по эфиру со скоростью 300 000 км/с). Отметим, что на концепции близкодействия основывался, по сути дела, мир Аристотеля и тем более мир Декарта.

Исаак Ньютон сформулировал в 1687 году закон всемирного тяготения, не предложив при этом какого-либо объяснения, *почему* две массы должны взаимно притягиваться. Достигнутые на основе применения этого закона успехи в исследовании Солнечной системы оказались, как известно, весьма впечатляющими. Для многих ученых, являвшихся сторонниками ньютоновской механики, было вполне достаточно того, что закон всемирного тяготения прекрасно «работал»; для них представлялся излишним поиск посредников, передающих гравитационное взаимодействие. Вот тогда и сформировалась концепция действия на рас-

стоянии непосредственно через пустоту. *Постулировалась* способность тел «ощущать» присутствие друг друга без наличия какой-либо среды между ними. И не просто «ощущать», а оказывать друг на друга силовое воздействие.

Когда в 1785 году известный французский инженер и физик *Шарль Огюстен Кулон* (1736–1806), воспользовавшись сконструированными им крутильными весами, установил закон взаимодействия электрических зарядов (известный ныне как закон Кулона), то это было воспринято всеми ньютонианцами как безусловное *подтверждение концепции действия на расстоянии*. Если Ньютон открыл действие на расстоянии для сил тяготения, то Кулон открыл действие на расстоянии для электрических сил. В случае электрических зарядов, как и в случае масс, сила взаимодействия убывает с расстоянием R по закону $1/R^2$ (*закону обратных квадратов*) и направлена вдоль прямой, проходящей через взаимодействующие тела. В случае масс это всегда сила *взаимного притяжения*, а в случае зарядов возможны как *взаимное притяжение*, так и *взаимное отталкивание*.

Шарлю Кулону удалось экспериментально показать, что сила магнитного взаимодействия концов двух магнитных стрелок (двух магнитных полюсов) также подчиняется закону обратных квадратов. Это наталкивало на мысль о существовании «магнитных зарядов» и, соответственно, еще одного закона, аналогичного закону всемирного тяготения и закону Кулона, — закона, описывающего силу взаимного притяжения или отталкивания магнитных зарядов (магнитных полюсов).

Таким образом, к началу XIX века физики располагали тремя весьма похожими друг на друга законами, выражающими силу F взаимодействия на расстоянии:

$$\text{— для масс } m_1 \text{ и } m_2: \quad F \sim m_1 m_2 / R^2, \quad (1)$$

$$\text{— для электрических зарядов } q_1 \text{ и } q_2: \quad F \sim q_1 q_2 / R^2, \quad (2)$$

$$\text{— для магнитных зарядов } M_1 \text{ и } M_2: \quad F \sim M_1 M_2 / R^2. \quad (3)$$

Получалось, что природные явления описываются *тремя единообразными фундаментальными законами*. В соответствии с традицией механики Ньютона, силы разной природы (гравитационные, электрические, магнитные), действующие между двумя достаточно малыми телами, во-первых, *убывали с расстоянием по закону обратных квадратов*, и во-вторых, *действовали по прямой, проходящей через тела*. Эти силы действовали на расстоянии и весьма наглядно показывали, что не нуждаются в каких-либо посредниках каких-либо промежуточных звеньях для передачи воздействия от одного тела к другому.

Правда, никак не удавалось (и не удалось до сих пор) разделить на практике северный и южный полюсы магнита и тем самым получить намагниченное тело, обладающее «магнитным зарядом» *только одного* из двух типов (северным либо южным). Но это обстоятельство в то время не представлялось существенным. Никто не сомневался, что закон (3) столь же реален, как и законы (1) и (2). Как отмечал видный российский физик академик *Яков Борисович Зельдович* (1914–1987), «привлекало изящное единое описание всех дальностей — гравитационного, электрического, магнитного. Различие проявлялось только в разных мерах воздействия: гравитационная сила пропорциональна произведению масс тел, электрическая — произведению электрических зарядов, магнитная — произведению магнитных зарядов».

Можно сказать, что в самом начале XIX столетия в среде физиков практически не осталось картезианцев; почти все были сторонниками ньютоновской механики и, как таковые, решительно придерживались концепции действия на расстоянии в отношении гравитационного, электрического и магнитного взаимодействий. Здесь самое время сделать паузу и напомнить, что Ньютон в самом конце своих «Математических начал натуральной философии» написал такие слова: «Теперь следовало бы кое-что добавить о некоем тончайшем эфире, пронизывающем все тела и в них содержащемся, коего силою частицы тел взаимно притягиваются. Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны».

Это замечание весьма многозначительно. Оно говорит о том, что *сам Ньютон отнюдь не был сторонником концепции действия на расстоянии*. Более того, есть свидетельство тому, что его следует считать, скорее, противником дальностей. Мы имеем в виду известное письмо Ньютона к Бентли (священнику, превращавшему свои проповеди в научно-популярные лекции и живо интересовавшемуся проблемой возникновения Вселенной). Вот отрывок из этого письма.

«Непонятно, каким образом неодушевленная косная материя...могла бы действовать на другое тело без взаимного прикосновения, как это должно было бы иметь место, если бы тяготение, в смысле Эпикура, было присуще материи и с нею нераздельно... Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии через пустоту, без участия чего-то постороннего, — *это мне кажется столь большим абсурдом*, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому прийти» (курсив наш. — Л.Т.).

4.5 РОЖДЕНИЕ И НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП СТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

4.5.1. Сенсационная статья Ханса Эрстеда. В июле 1820 года известный датский физик *Ханс Кристиан Эрстед* (1777–1851) опубликовал статью, озаглавленную «Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку». Статья была небольшая — всего четыре страницы. Однако она произвела сенсацию в научном мире. Опыты Эрстеда немедленно повторили в Германии, Франции, Швейцарии, России.

Эрстед воспользовался «вольтовым столбом» как источником постоянного электрического тока и проделал весьма простые опыты (сегодня их может повторить любой школьник). Ученый поместил компас над горизонтально натянутым проводом с током и обнаружил, что магнитная стрелка *повернулась* и установилась *перпендикулярно* к проводу. Затем он поместил компас под проводом и обнаружил, что магнитная стрелка, сделав поворот на 180° , снова установилась перпендикулярно к проводу. Он убедился, что стрелка меняла расположение полюсов не только при смене положений компаса (над проводом либо под проводом), но и при изменении направлении тока в проводе. Наконец, Эрстед натянул провод с током вертикально и стал обносить компас в горизонтальной плоскости вокруг провода. Он обнаружил, что при этом стрелка компаса постепенно поворачивалась, оставаясь все время ориентированной перпендикулярно к прямой, проходящей через середину стрелки и точку пересечения провода с плоскостью обноса компаса.

Сенсационность опытов Эрстеда состояла в том, что, во-первых, магнитная сила, как оказалось, обнаруживается не только вблизи постоянного магнита, но и *вблизи движущихся электрических зарядов* (вблизи электрического тока), и во-вторых, сила оказалась не отталкивающей и не притягивающей, а *«поворачивающей»*. Магнитная сила, обнаруживаемая током, поворачивала магнитную стрелку «поперек», ориентируя ее всякий раз перпендикулярно к направлению тока. Тем самым нарушалось единообразие описания дальнодействий в ньютоновской механике. Можно было сказать, что поддерживаемая ньютонианцами концепция действия на расстоянии дала первую трещину.

Надо признать, что Эрстед вполне это сознавал. Из своих опытов он сделал вывод: «электрический конфликт, по-видимому, не ограничен проводящей проволокой, но имеет довольно обширную сферу активности вокруг этой проволоки. Кроме того, из сделанных наблюдений можно заключить, что этот конфликт образует вихрь вокруг проволоки». Этот эрстедовский *«вихрь вокруг проволоки»* определенно не согласуется с концепцией дальнодействия; он наталкивает на мысль о существова-

нии вокруг проволоки с током магнитного поля, образующего тот самый «вихрь» и действующего соответствующим образом на магнитную стрелку.

Впрочем, термин «магнитное поле» в то время еще не использовался, и подавляющее большинство физиков твердо придерживалось концепции дальнего действия. Одним из немногих, кого слова Эрстеда о «вихре вокруг проволоки» заставили крепко задуматься, был *Майкл Фарадей*, работавший в молодости переплетчиком, а затем ставший лаборантом у знаменитого английского химика *Гемфри Дэви* (1778–1829). Фарадею было тогда всего 29 лет, его звезда еще не возшла.

После опытов Эрстеда стало ясно, что между электрическими и магнитными явлениями существует взаимосвязь. Возникли две точки зрения. Согласно одной, *все можно было свести к магнитным явлениям*: провод, по которому течет ток, оказывается магнитом и как таковой действует на магнитную стрелку (электрический флюид заменяется магнитным флюидом). Согласно другой точке зрения, *все следует сводить к электрическим явлениям*: магнитная стрелка состоит из *круговых микроскопических электрических токов*, и эти токи взаимодействуют с током, текущим по проводу (в этом случае исчезает магнитный флюид, заменяясь электрическим флюидом). Вторая точка зрения была выдвинута знаменитым французским физиком *Андре Мари Ампером* (1775–1836). Сегодня, когда известно, что у каждого атома есть электронная оболочка, существование в любом теле микроскопических электрических токов представляется естественным. Однако во времена Ампера вообще не рассматривалась внутренняя структура атома; поэтому гипотезу о замкнутых электрических токах в телах надо рассматривать как свидетельство большой научной смелости ученого.

4.5.2. Взаимодействие электрических токов и прощание с магнитными флюидами. Известно, что немедленно после ознакомления с опытами Эрстеда академик Андре Ампер в течение всего лишь двух-трех месяцев буквально обрушил на членов Французской академии наук с десятков следующих одно за другим сообщений о результатах своих исследований, и, таким образом, состоялось рождение новой научной дисциплины. Ампер назвал ее электродинамикой. В 1826 году он опубликовал свой основной труд с изложением основ электродинамики под названием «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта».

Говоря о научном наследии Ампера, отметим, прежде всего, его вывод о том, что *магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него*. Отсюда следовало, что магнитное

взаимодействие обусловлено не таинственными магнитными зарядами (постулированными Кулоном), а движущимися электрическими зарядами. Короче говоря, *магнитное взаимодействие есть не что иное, как взаимодействие токов*. Тем самым состоялось прощание с магнитными флюидами; неразделимость магнитных полюсов утратила загадочность, коль скоро стало ненужным само понятие магнитных зарядов.

В октябре 1820 года Ампер продемонстрировал в Академии наук два опыта. В одном он показал, что два параллельных прямолинейных провода с током взаимно притягиваются, если токи имеют одно и то же направление, и расталкиваются, если направления токов противоположны. В другом опыте ученый продемонстрировал взаимодействие двух проводов с током, выполненных в виде соленоидов. Он показал, что соленоиды взаимодействуют так же, как взаимодействовали бы два магнита. Тем самым наглядно подтверждалась идея Ампера о том, что магнитное взаимодействие есть взаимодействие токов.

В своих последующих сообщениях Ампер показал, что маленький по площади *контур с током* (точнее сказать: нормаль к плоскости контура) ведет себя вблизи проводов с токами так же, как и магнитная стрелка. Роль северного полюса стрелки играет тот конец нормали, глядя с которого на контур, мы видим ток в контуре текущим *против часовой стрелки* (под направлением тока понимают направление движения положительных зарядов). Такой контур с током оказался неплохим прибором для измерения воздействия, оказываемого системой токов на магнитный полюс, находящийся в той или иной точке пространства вблизи этой системы.

Закон действия тока на магнитный полюс был экспериментально установлен в конце октября 1820 года французскими физиками *Жаном Батистом Био* (1774–1862) и *Феликсом Саваром* (1791–1841) и представлен в строгом математическом виде *Пьером Лапласом*. Ныне он известен как *закон Био–Савара–Лапласа*. Этот закон оказался одним из краеугольных камней в разработанной Ампером теории электродинамических явлений.

В любом современном учебнике по электродинамике закон Био–Савара–Лапласа объясняют, *используя понятие магнитного поля* (точнее говоря, понятие векторной характеристики поля — магнитной индукции $\mathbf{B}$). Указанный закон записывают в следующем виде (с точностью до коэффициента пропорциональности, определяемого выбором системы единиц):

$$\Delta B \sim I \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha / R^2. \quad (4)$$

Здесь ΔB — модуль вектора магнитной индукции $\Delta \mathbf{B}$, создаваемой элементом тока $I \cdot \Delta l$ в точке наблюдения, находящейся на расстоянии R от этого элемента; через

α обозначен угол между направлением элемента тока и прямой от элемента тока к точке наблюдения. Под элементом тока $I \cdot \Delta l$ понимают коротенький прямолинейный провод длиной Δl , по которому течет ток силой I . Если элемент тока $I \cdot \Delta l$ поместить в точку поля, характеризующуюся магнитной индукцией $\mathbf{B}$, то на этот элемент будет действовать сила, модуль ΔF которой определяется соотношением:

$$\Delta F \sim I \Delta l \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где α — угол между направлениями элемента тока и вектора $\mathbf{B}$. Соотношение (5) называют *законом Ампера*, отдавая должное вкладу Ампера в становление электродинамики.

В целом получается достаточно изящная схема. *Первый ток порождает вокруг себя поле*, магнитная индукция которого в той или иной точке поля определяется с помощью закона Био–Савара–Лапласа. А сила, с какой *магнитное поле действует на второй ток*, определяется с помощью закона Ампера — и в результате мы находим силу, с какой *первый ток действует на второй*, т. е. ту самую силу, которую впервые открыл и исследовал Ампер.

К сожалению, ни Ампер, ни Био, ни Савар, ни Лаплас понятием поля не пользовались, упорно оставаясь верными концепции действия на расстоянии. Такое упорство никак не способствовало ясности изложения мыслей. Можно признать достаточную строгость их математических построений; однако изящными эти построения назвать нельзя. Как справедливо отмечает профессор *А.И. Кутайгородский* в своей книге «Электрон» (М.: «Наука», 1979),

«крайне трудно читать оригинальные работы физиков, работавших в те времена. Экспериментальные находки излагаются чуждым нам языком. В ряде случаев невозможно понять, что же подразумевал автор под тем или иным словом. Имена великих ученых живут в памяти потомков лишь благодаря заботам историков науки».

4.5.3. Как понимать линии электрической напряженности и линии магнитной индукции? Перенесемся на время мысленно из XIX столетия в наше и откроем какой-нибудь учебник по электродинамике. Мы непременно встретимся с понятиями *электрического поля* и *магнитного поля* как материальных, реально существующих феноменов.

Главное свойство электрического поля состоит в том, что оно действует с определенной силой на электрический заряд. Количественная характеристика электрического поля — вектор *электрической напряженности* $\mathbf{E}$, изменяющийся, вообще говоря, от точки к точке внутри поля. Электрическое поле создается либо неподвижными электрическими зарядами (и тогда его называют *электростатическим полем*), либо переменным во времени магнитным полем (и тогда его называют *вихревым электрическим полем*). Если точечный заряд q поместить в точку поля,

характеризующуюся электрической напряженностью E , то на заряд будет действовать сила

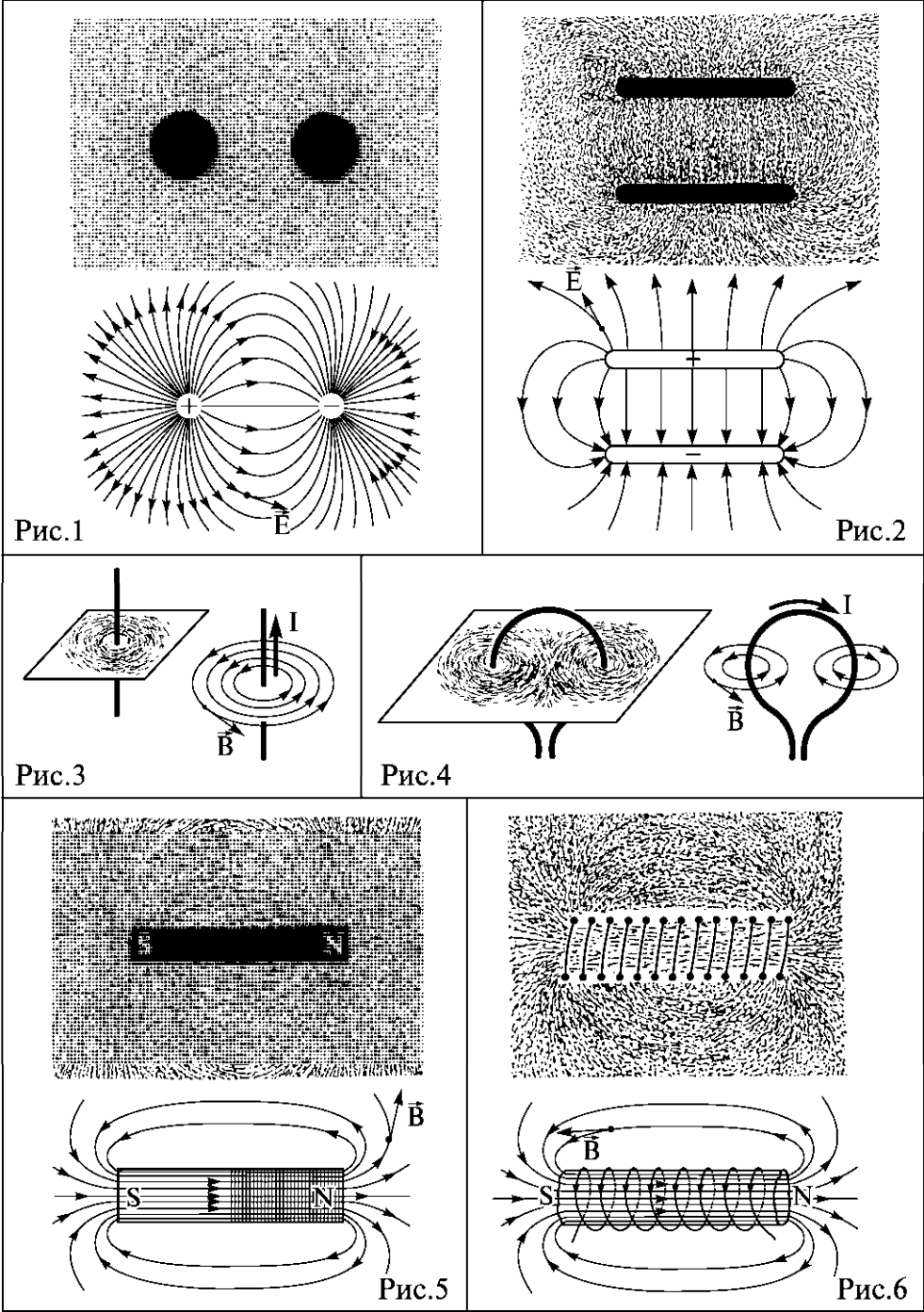
$$F = qE. \quad (6)$$

Главное свойство магнитного поля состоит в том, что оно действует с определенной силой на ток (движущийся заряд). Количественная характеристика магнитного поля — *вектор магнитной индукции* B , изменяющийся, вообще говоря, от точки к точке внутри поля. Магнитное поле создается токами (движущимися зарядами) и всегда является, в отличие от электрического поля, *вихревым*. Если элемент тока $I \cdot \Delta l$ поместить в точку поля, характеризующуюся магнитной индукцией B , то на этот элемент тока будет действовать сила, определяемая законом Ампера. Модуль этой силы описывается соотношением (5), а направление перпендикулярно к плоскости векторов тока и магнитной индукции (если глядеть с конца вектора силы на указанную плоскость, то вектор тока можно совместить с вектором магнитной индукции в результате соответствующего поворота вектора тока *против часовой стрелки*).

Как электрическое, так и магнитное поле удобно представлять наглядно в виде *силовых линий* — *линий электрической напряженности* для электрического поля и *линий магнитной индукции* для магнитного поля. В каждой точке линии электрической напряженности (линии магнитной индукции) вектор E (вектор B) направлен по *касательной* к линии. На рисунках 1 и 2 на таблице 4 даны примеры линий электрической напряженности. На рисунке 1 рассматривается электростатическое поле, созданное двумя одинаковыми по величине, но разными по знаку зарядами (заряды находятся на шариках одинакового радиуса). На рисунке 2 рассматривается электростатическое поле, созданное двумя разноименно заряженными параллельными пластинами. На рисунках 3–6 на таблице 4 можно видеть линии магнитной индукции для случаев, когда поле создано прямолинейным током (см. рис. 3), круговым током (рис. 4), полосовым магнитом (рис. 5), соленоидом (рис. 6). Линии электрической напряженности на рисунках 1 и 2 начинаются на положительно заряженных телах, а заканчиваются на отрицательно заряженных. Линии магнитной индукции всегда замкнутые.

На каждом из приведенных в таблице 4 рисунков наряду с изображением силовых линий полей представлены соответствующие фотографии, позволяющие вполне ощутимо «увидеть» структуру соответствующего электрического или магнитного поля. Поля на рисунках 1 и 2 можно «увидеть», если взмутить в какой-нибудь вязкой жидкости (скажем, в касторовом масле) продолговатые кристаллики какого-либо диэлектрика (скажем,

Таблица 4. Электрическое поле и магнитное поле



кристаллики хинина). Магнитные поля на рисунках 3–6 можно «наблюдать» еще проще — с помощью железных опилок, рассыпанных по листу картона. Рисунок 3, заметим, хорошо демонстрирует те самые «вихри», о которых писал Эрстед в своей столь нашумевшей статье.

После сделанных замечаний вернемся мысленно в первую половину XIX столетия и отметим, что исторически впервые образ силовых линий был введен в научный обиход выдающимся английским физиком, гениальным ученым-самоучкой *Майклом Фарадеем* (1791–1867). Обдумывая открытое им в 1831 году явление *электромагнитной индукции*, Фарадей ввел понятие «*магнитных кривых*». «Под магнитными кривыми я понимаю, — писал он, — линии магнитных сил, хотя и искаженные соседством полюсов; эти линии вырисовываются железными опилками; к ним касательно располагались бы магнитные стрелочки». В наше время под фарадеевскими «магнитными кривыми» понимаются линии магнитной индукции.

Выступая против общепринятой в то время в научных кругах концепции дальнодействия, Фарадей придал *реальный*, физический смысл понятию, которое до того если и рассматривалось, то только как сугубо формальное, *чисто математическое* описание дальнодействия. Достаточно известное в те времена свойство железных опилок выстраиваться вдоль направления действия магнитных сил Фарадей рассматривает как способ исследования свойств таинственной среды, окружающей магниты или токи. Он писал: «Экспериментатор, желающий изучать магнитную силу посредством проявления ее магнитными силовыми линиями, поступил бы опрометчиво, отказавшись от самого ценного средства, от употребления железных опилок. Пользуясь ими, он может многие свойства этой силы, даже в очень сложных случаях, тотчас показать наглядно, может проследить глазом различные направления силовых линий и определить относительную полярность, может наблюдать, в каком направлении сила эта возрастает, в каком убывает, а в сложных системах может определить нейтральные точки, или места, где нет ни полярности, ни силы». Ставя вопрос ребром, Фарадей писал: «Что касается важного вопроса, подлежащего рассмотрению, то он заключается только в том, *имеют ли линии магнитной силы физическое существование или нет*» (курсив наш. — Л.Т.). Для Фарадея очевиден положительный ответ на этот вопрос.

А как реагировала на все это официальная наука? Оставить без внимания идеи Фарадея было невозможно — ведь в 1824 году бывший переплетчик и лаборант был избран членом Лондонского Королевского общества. Однако и поддерживать пропагандируемую Фарадеем кон-

цепцию близкодействия научные авторитеты не спешили. Эта ситуация неплохо освещена в книге *В.П. Карцева «Приключения великих уравнений»* (М.: «Знание», 1986):

«Нельзя сказать, что появление на свет фарадеевских идей, прочно связанных с понятием «силовых линий» и «силовых трубок», было встречено с восторгом. Непричесанное дитя бывшего переплетчика было не под стать прекрасно математически оформленным созданиям знаменитых французов Кулона, Ампера, Био и Лапласа... Фарадеевская теория силовых линий и трубок, занимающих все пространство, в этой блестящей компании была явной золушкой, хотя и заметной, но слишком уж непрезентабельной, чтобы ее принимать всерьез».

Как уже было сказано, фарадеевские силовые линии появились в 1831 году. В том же году произошло еще одно событие, которое существенным образом определило дальнейшую судьбу фарадеевских линий. В этом году родился *Джеймс Клерк Максвелл*.

Ко времени Максвелла существовали, по сути дела, две разных теории электричества. Главенствовала исходящая из концепции далекодействия теория, разработанная знаменитыми французами, членами Французской академии наук. Пробивалась на свет теория «силовых линий» Фарадея, исходявшая из концепции близкодействия. Пройдет сорок лет, и в 1873 году Максвелл в предисловии к своему знаменитому «Трактату об электричестве и магнетизме» напишет следующие слова, прекрасно характеризующие фарадеевский «метод понимания явлений»:

«Приступив к изучению трудов Фарадея, я установил, что его метод понимания явлений был также математическим, хотя и не представленным в форме обычных математических символов. Я также нашел, что этот метод можно выразить в обычной математической форме и, таким образом, сравнить с методами профессиональных математиков.

Так, например, Фарадей видел силовые линии, пронизывающие все пространство, там, где математики видели центры сил, притягивающих на расстоянии; Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояния; Фарадей предполагал источник и причину явлений в реальных действиях, протекающих в среде, они же были удовлетворены тем, что нашли их в силе действия на расстоянии, приписанной электрическим флюидам.

Когда я переводил то, что считал идеями Фарадея, в математическую форму, я нашел, что в большинстве случаев результаты обоих методов совпадали, так что ими объяснялись одни и те же явления и выводились одни и те же законы действия, но что методы Фарадея походили на те, при которых мы начинаем с целого и приходим к частному путем анализа, в то время как обычные математические методы основаны на движении от частных и построения целого путем синтеза.

Я также нашел, что многие из открытых математиками плодотворных методов исследования могли быть значительно лучше выражены с помощью идей, вытекающих из работ Фарадея, чем в их оригинальной форме».

4.6 ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ XIX СТОЛЕТИЯ (ЭЛЕКТРОДИНАМИКА КАК ТЕОРИЯ БЛИЗКОДЕЙСТВИЯ)

После того как Фарадей обратил внимание на существенную роль среды, Максвелл, продолжив анализ, пришел к предположению, что электромагнитные действия передаются со скоростью света, а Герц опытным путем доказал правильность этого предположения. Это и явилось исходным пунктом электромагнитной теории света, не вызывающей ныне никаких сомнений.

Поль Ланжевен

4.6.1. Открытие Фарадеем явления электромагнитной индукции; объединение электричества и магнетизма. «Представляется весьма необычным, — писал Фарадей, — чтобы, с одной стороны, всякий электрический ток сопровождался магнитным действием и чтобы в то же время в хороших проводниках электричества, помещенных в сферу действия магнита, совсем не индуцировался ток». Это было написано вскоре после открытия Эрстеда. В 1821 году Фарадей записал в своем дневнике: «*Пре-вратить магнетизм в электричество*». Он полагал, что коль скоро электричество превращается в магнетизм, то, исходя из общих соображений (точнее сказать, из соображений симметрии) должно наблюдаться также превращение магнетизма в электричество.

В 1831 году Фарадею удалось, наконец, наблюдать такое превращение, называемое ныне *явлением электромагнитной индукции*. Отвлекаясь от технических деталей (и, в частности, не останавливаясь на технологических подробностях выполнения Фарадеем его экспериментов), напомним лишь самую суть явления электромагнитной индукции.

Возьмем провод в виде металлического кольца (замкнутый проводящий контур) и обычный полосовой магнит. Если мы будем вводить магнит внутрь контура и затем выводить его оттуда, то сможем при наличии в цепи кольца гальванометра наблюдать возникновение в кольце тока и, следовательно, электрического поля. Это и есть явление электромагнитной индукции, фарадеевское «превращение магнетизма в электричество». Ток возникает в замкнутом контуре несмотря на то, что в цепи нет ни аккумулятора, ни иного источника тока. В данном случае *электрическое поле создается переменным во времени магнитным полем*, силовые линии которого пересекают площадь контура. Это есть *вихре-*

вое (*циркулирующее*) *электрическое поле*; его силовые линии являются замкнутыми линиями, идущими вдоль кольцевого провода.

При внесении магнита в контур индукция магнитного поля внутри контура возрастает, а при выведении магнита из контура — ослабевает. При внесении магнита индукционный ток имеет одно направление, а при выведении магнита — противоположное направление. Известный российский физик и электротехник *Эмилий Христианович Ленц* (1804–1865) установил правило для *определения направления индукционного тока*. Направление тока всегда таково, что создаваемое им магнитное поле *препятствует* изменению магнитного поля, вызывающему индукционный ток. Вот мы начинаем вносить магнит внутрь проводящего контура. В контуре возникнет ток такого направления, чтобы магнитное взаимодействие этого тока и магнита препятствовало внесению магнита в контур. Нам придется затратить на процесс внесения магнита в контур немного больше энергии (чем если бы мы вносили в контур обычный карандаш), и именно этот избыток энергии превратится в энергию индукционного тока, точнее сказать, в энергию электрического поля, порождающего индукционный ток. В конечном счете, направление индукционного тока определяется не чем иным, как законом сохранения энергии.

Подчеркнем, что для возникновения индукционного тока необходимо, чтобы индукция магнитного поля внутри контура *изменялась во времени* (или возрастала, или убывала). Если она не будет изменяться (например, если мы, надев на магнит кольцевой провод, оставим его в таком положении), то индукционный ток прекратится. Именно поэтому *Фарадей* не мог наблюдать тока «в хороших проводниках электричества, помещенных в среду действия магнита».

Открытие явления электромагнитной индукции сделало возможным появление в скором времени целого ряда серьезных технических изобретений, среди которых на первое место надо поставить изобретение *электромотора* и *электрогенератора*. На смену веку пара пришел век электричества. В научном плане указанное открытие означало *синтез электричества и магнетизма*.

Справка. По-видимому, мир не знал более великого физика-экспериментатора, чем *Майкл Фарадей*. Вот неполный список его выдающихся научных достижений: открыл явление электромагнитной индукции; создал первые в мире работающие модели электромотора и электрогенератора (фактически явился изобретателем электромотора и электрогенератора); установил законы электролиза и тем самым основал новую науку — электрохимию; открыл и исследовал явления парамагнетизма и диамагнетизма; открыл явление вращения плоскости поляризации света в

магнитном поле и тем самым дал первое доказательство прямой связи оптических и электромагнитных явлений. По поводу последнего открытия Фарадей с удовлетворением констатировал: «В конце концов, мне удалось намагнитить и наэлектризовать луч света и осветить магнитную силовую линию!» За период с ноября 1831 по октябрь 1855 года этот великий труженик представил Лондонскому Королевскому обществу тридцать серий своих знаменитых «Экспериментальных исследований по электричеству». Они были изданы при жизни ученого в двух томах (в первом томе 1–14 серии: исследования Фарадея, выполненные в 1831–1839 гг.; во втором томе 15–30 серии: исследования, выполненные в 1839–1855 гг.).

4.6.2. Создание Максвеллом теории электромагнитного поля; объединение электричества, магнетизма, оптики. В 1856 году *Джеймс Клерк Максвелл* закончил свою работу, озаглавленную «О фарадеевских силовых линиях». По-видимому, именно в этой работе впервые прозвучал новый в науке термин «электромагнитное поле». Хотя в работах Фарадея, посвященных магнитным линиям, не использовалось понятие поля, однако ясно, что в них речь шла фактически именно о том объекте исследования, которое вскоре Максвелл назвал «электромагнитным полем». Так что, говоря о появлении в науке нового принципиально важного понятия *физического поля* как еще одной *формы материи* (наряду с веществом), мы должны в равной мере отдать должное как *Джеймсу Максвеллу*, так и *Майклу Фарадею*. Заметим, что еще в 1852 году Фарадей писал: «Среда или пространство, окружающие магнит, играют столь же существенную роль, как и самый магнит, будучи частью настоящей и полной магнитной системы». Фактически Фарадей говорил здесь именно о физическом поле; для него это было то, что *излучается, распространяется с конечной скоростью в пространстве* (существуя в это время «независимо как от своего источника, так и от места, в которое в конце концов приходит»), *взаимодействует с веществом*. Приведем выдержку из научно-популярной книги *Я.Б. Зельдовича, М.Ю. Хлопова* «Драма идей в познании природы» (М.: «Наука», 1988):

«Максвелл, уверенный в существовании такой среды, передающей электромагнитное взаимодействие, разрабатывает математическое описание электромагнитных явлений на основе концепции близкодействия, на основе формализма «теории поля», как мы ее называем сегодня, или «динамической теории электромагнитного поля», как он ее назвал. *Придавая идеям Фарадея форму математических уравнений, Максвелл создает физическую теорию, основанную на единстве электричества и магнетизма*» (курсив наш. — Л.Т.).

В статье «Динамическая теория поля» (1865) Максвелл писал: «Теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией электромагнитного поля, потому что она имеет дело с пространством, окружающим

электрические или магнитные тела, и она может быть названа также динамической теорией, поскольку допускает, что в этом пространстве имеется среда, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления». Говоря о «*среде, находящейся в движении*», Максвелл по традиции отдавал дань *механистическим представлениям*. В начале своих исследований по теории поля он потратил немало фантазии, чтобы сконструировать возможную механическую модель электромагнитного поля, включающую в себя композиции из различного рода «зацепляющихся колесиков», «шестеренок», «пружинок». Позднее он разъяснил, что его теория поля отнюдь не нуждается в какой-либо механической интерпретации, и что он хотел «направить мысль читателя на механические явления только затем, чтобы те помогли ему понять электрические явления». Не более того.

Как известно, основу максвелловской теории электромагнитного поля составляет система из четырех знаменитых *уравнений Максвелла*. Она играет в электродинамике такую же фундаментальную роль, какую играет система законов Исаака Ньютона в классической механике. Предполагая, что наши читатели не владеют математическим аппаратом *векторного анализа*, мы обойдемся без представления уравнений Максвелла в математическом виде и ограничимся качественными пояснениями.

Два первых уравнения Максвелла касаются электрического *поля* и выражают по сути дела закон Кулона (первое уравнение) и фарадеевский закон электромагнитной индукции (второе уравнение). Напомним, что электрическое *поле* создается двумя путями: наличием неподвижных электрических зарядов и с помощью переменного во времени магнитного поля. Рассматривая закон Кулона с позиций концепции близкодействия, Максвелл исходил из того, что сначала первый заряд создает вокруг себя электрическое поле, а затем это поле действует на второй заряд.

Первое уравнение Максвелла как раз и выражает тот факт, что положительные заряды служат *истоками* линий электрической напряженности, тогда как отрицательные заряды являются *стоками* (окончаниями) этих линий. Согласно закону электромагнитной индукции, при изменении во времени магнитной индукции внутри кольцевого металлического провода в последнем индуцируется ток, т. е. возникает электрическое поле, линии напряженности которого, как и провод, охватывают кольцеобразно магнитное *поле*. Максвелл справедливо рассудил, что циркулирующее электрическое поле может возникнуть не обязательно в металлическом проводе, *но и в пустоте* — лишь бы охватываемый циркулирующим (вихревым) электрическим полем поток линий магнитной

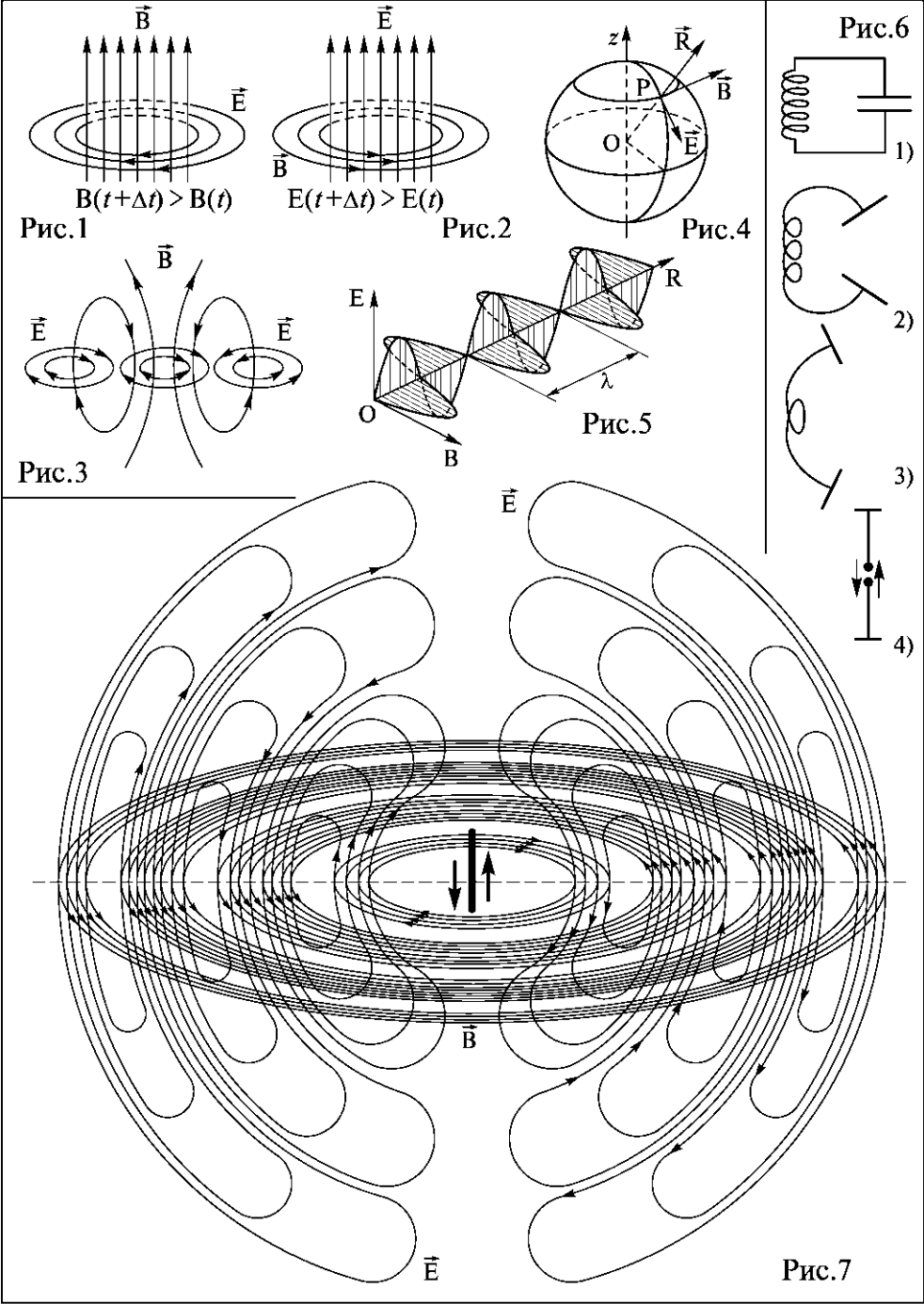
индукции *менялся во времени*. Этот вывод Максвелл математически записал в виде второго уравнения, являющегося, таким образом, выражением того факта, что около меняющегося во времени потока линий магнитной индукции возникают замкнутые линии электрической напряженности (см. рисунок 1 в таблице 5).

Третье и четвертое уравнения Максвелла касаются магнитного *поля*. *Третье уравнение* выражает тот факт, что магнитные заряды в природе не наблюдаются. В *четвертом уравнении* нашли выражение, во-первых, закон Био—Савара—Лапласа (вокруг электрического тока возникают замкнутые линии магнитной индукции) и, во-вторых, гипотеза Максвелла о так называемых «*токах смещения*». Суть этой гипотезы состоит в том, что замкнутые линии магнитной индукции могут возникать не только вокруг тока, но и вокруг меняющихся во времени линий электрической напряженности в пустоте. Это схематически показано в таблице 5 на рисунке 2, который может быть получен из рисунка 1, если в последнем поменять местами электрическое и магнитное поля. Заметим, что Максвелл пришел к гипотезе «тока смещения», исходя не только из соображений симметрии, но и из требований закона сохранения электрического заряда.

Из уравнений Максвелла следует, что электрическое и магнитное поля можно рассматривать порознь, строго говоря, только в случаях, когда электрические заряды неподвижны или движутся равномерно и прямолинейно, т. е. создают постоянный электрический ток (иначе говоря, в *электростатике* или в *магнитостатике*). Движение зарядов с ускорением приводит к возникновению переменных во времени электрического и магнитного полей. Но согласно второму уравнению Максвелла, переменное во времени магнитное поле приводит к появлению электрического поля (тоже переменного во времени). А согласно четвертому уравнению Максвелла, переменное во времени электрическое поле порождает магнитное поле (тоже переменное). В результате возникает *электромагнитное* поле, которое, перемещаясь по пространству, *переносит электромагнитное воздействие из одной точки в другую*.

Предположим, что в точке *A* находится заряд q_1 , а в точке *B* — заряд q_2 . Допустим, что в какой-то момент времени t_0 заряд q_1 сдвинулся с места. Согласно концепции дальнего действия, в тот же момент t_0 должен сдвинуться заряд q_2 (ведь данная концепция полагает, что один заряд непосредственно через расстояние «чувствует» присутствие и поведение другого заряда). По Максвеллу (т. е. в соответствии с концепцией ближнего действия) все происходит иначе. Перемещение заряда q_1 меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле в соседних областях простран-

Таблица 5. Электромагнитные волны



ства, а то поле, в свою очередь, рождает переменное электрическое поле и так далее. Возникающее вихревое магнитное или вихревое электрическое поле гасит поле в тех областях пространства, где оно уже имелось, но захватывает новые области пространства (см. рисунок 3 в таблице 5) — и вот электромагнитное воздействие, распространяясь с некоторой конечной скоростью во все стороны от точки A , достигает в некоторый момент времени t_1 (ясно, что $t_1 > t_0$) точки B , и тогда сдвигается с места заряд q_2 .

Максвелл показал математически, что скорость распространения описанного выше процесса *равна скорости света в пустоте*. Это, во-первых, доказывало *материальность электромагнитного поля* и, во-вторых, *включало в теорию Максвелла оптические явления*. С учетом отмечавшегося ранее открытия Фарадеем явления вращения плоскости поляризации света в магнитном поле, можно сделать вывод о том, что произошел *синтез электричества, магнетизма и оптики*. Как выяснилось, все три типа явлений — электрические, магнитные и оптические — имеют единую природу и могут описываться *общей* системой уравнений — уравнениями Максвелла.

4.6.3. Электромагнитные волны. Итак, взаимосвязанные переменные электрические и магнитные поля распространяются в пространстве со скоростью света. Они представляют собой *электромагнитные волны*. Рисунки 4 и 5 в таблице 5 показывают для фиксированного момента времени, как изменяются векторы $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$ в электромагнитной волне с расстоянием (по мере удаления от центра O , в котором находится возбуждающий волну колеблющийся заряд). Электромагнитная волна распространяется от O во все стороны (сферическая волна), но на рисунке 5 выбрано определенное направление распространения волны — вдоль оси OR . Векторы $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$ в волне перпендикулярны друг к другу и перпендикулярны к направлению распространения волны. Электромагнитная волна является *поперечной*. Если вращать буравчик с правой нарезкой от вектора $\mathbf{E}$ к вектору $\mathbf{B}$, то поступательное перемещение буравчика будет совпадать с направлением распространения волны. Через λ на рисунке обозначена длина волны.

Лучи видимого света — это электромагнитные волны в интервале длин волн от $\lambda = 4 \cdot 10^{-5}$ см (фиолетовые лучи) до $\lambda = 7,4 \cdot 10^{-5}$ (красные лучи). Им соответствуют частоты электромагнитных колебаний в интервале, соответственно, от $\nu = 7,5 \cdot 10^{14}$ Гц до $\nu = 4 \cdot 10^{14}$ Гц (напомним, что $\nu = c/\lambda$, где c — скорость света).

Высокочастотные электромагнитные колебания можно получить с помощью *колебательного контура*. Чтобы эти колебания порождали элек-

ромагнитную волну, нужен *открытый* колебательный контур. На рисунке 6 в таблице 5 схематически показано, как, постепенно переходя от позиции 1 к позиции 4, можно превратить закрытый колебательный контур в открытый. В 1887 году известный немецкий физик *Генрих Рудольф Герц* (1857–1894), используя в качестве открытого колебательного контура отрезок прямого провода с небольшим воздушным промежутком посередине (так называемый *вибратор Герца*), экспериментально доказал *существование электромагнитных волн*. Они регистрировались Герцем с помощью приемного вибратора, аналогичного излучающему вибратору. Расстояние между вибраторами составляло несколько метров. Электромагнитные волны имели длину около 70 см ($v = 4,3 \cdot 10^8$ Гц).

На рисунке 7 в таблице 5 изображены для фиксированного момента времени силовые линии электрического и магнитного полей вокруг излучающего вибратора. Линии магнитной индукции расположены на рисунке в горизонтальной плоскости, а линии электрической напряженности — в вертикальной плоскости. Наиболее интенсивно излучение волн происходит в направлении, перпендикулярном к оси вибратора; оно показано на рисунке пунктирной прямой. Вдоль оси вибратора излучения нет.

Справка. В 1895 году известный российский физик и электротехник *Александр Степанович Попов* (1859–1906) продемонстрировал первый в мире вариант радиоприемника, в 1897 году он демонстрировал действие первого радиопередатчика и передал на расстояние около 200 м радиограмму, состоящую из двух слов «Генрих Герц». А.С. Попов получил Золотую медаль на Всемирной выставке в Париже в 1900 году.

4.7 БЕСЕДА О МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ, СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ

Автор. Своим возникновением и существованием жизнь на Земле обязана, в первую очередь, *солнечному излучению*. Напомним, что в § 11.2 в книге «Вероятность в современном обществе» солнечный свет рассматривался как *первоисточник негэнтропии*, столь необходимой для жизнедеятельности организмов. О принципиально важной роли солнечного излучения в глобальном антиэнтропийном процессе, каким является эволюция жизни на Земле, говорилось в § 11.5 упомянутой книги. Там, в частности, отмечалось появление 3 миллиарда лет назад первичных автотрофов с бескислородным фотосинтезом.

Читатель. Все это можно выразить кратко: Солнце — источник жизни на Земле.

Автор. Это, конечно, так. Но сейчас хотелось бы обратить внимание на «другую сторону медали». Солнце — не только источник жизни на Земле, но одновременно и постоянная *угроза жизни*.

Читатель. От губительного воздействия солнечных лучей нашу планету защищает ее *атмосфера* и, в частности, озоновый слой.

Автор. Солнечные лучи — это распространяющиеся от Солнца электромагнитные волны в весьма широком диапазоне частот. Земная атмосфера в самом деле защищает нас от их чрезмерного воздействия, которое могло бы стать для нас губительным. Однако кроме электромагнитных волн есть еще так называемый *солнечный ветер* — истечение *плазмы солнечной короны* в межпланетное пространство. Частицы солнечного ветра — это в основном *протоны* и *электроны*. У орбиты Земли скорость протонов солнечного ветра составляет 300–700 км/с, а их пространственная концентрация порядка 10 частиц в кубическом сантиметре. Так вот от солнечного ветра земная атмосфера — защита ненадежная.

Читатель. Что же защищает нас от солнечного ветра?

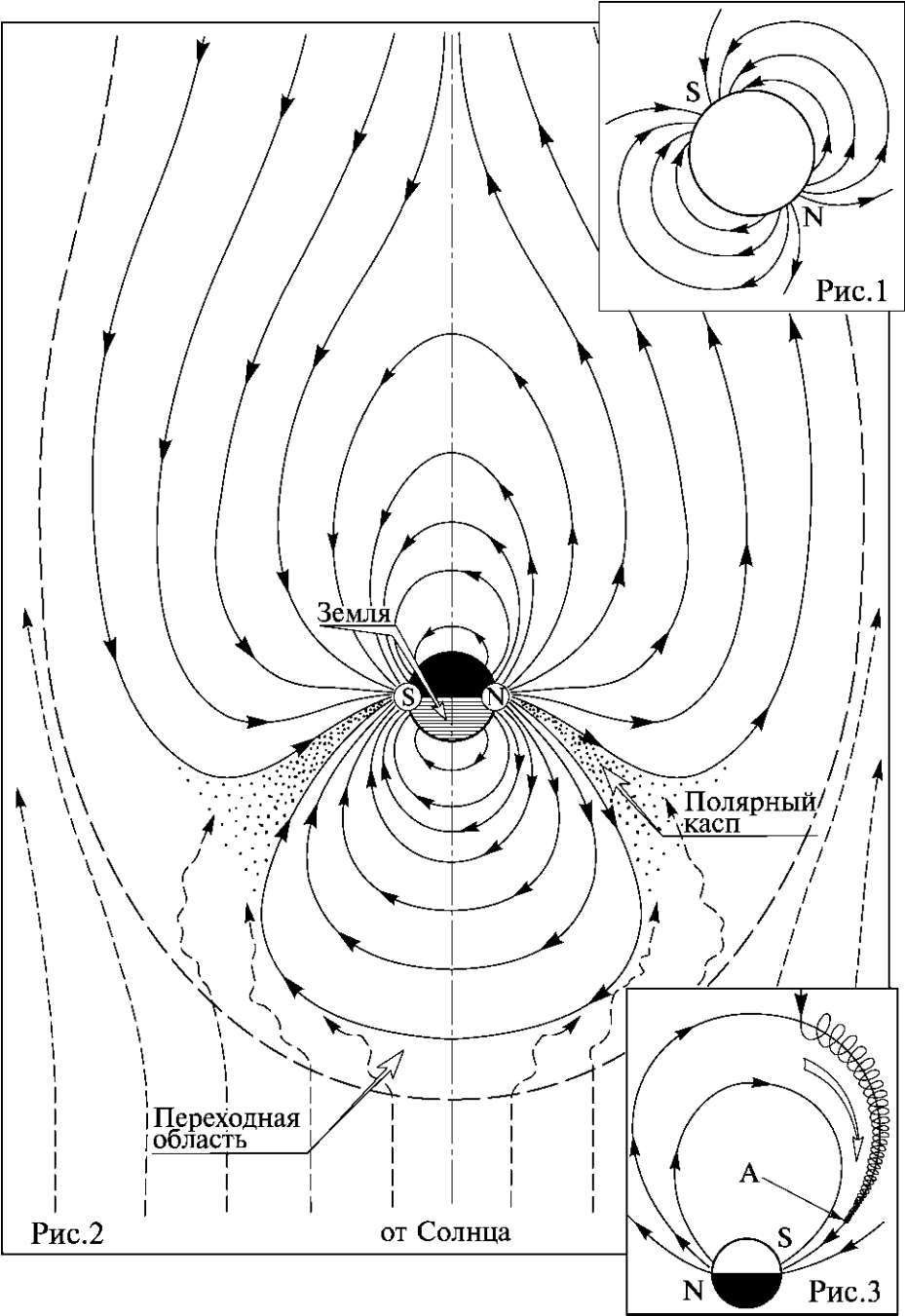
Автор. Защищает нас магнитное поле Земли. Его называют *магнитосферой*.

Читатель. Я знаю, что земной шар — это большой магнит, южный полюс которого находится недалеко от Северного географического полюса (на одном из островов Канадского Арктического архипелага), а северный полюс находится где-то недалеко от Южного географического полюса. Линии магнитной индукции Земли-магнита напоминают изображенные на рисунке 5 в таблице 40 магнитные линии полосового магнита. На рисунке 1 в таблице 6 я изобразил силовые линии магнитного поля Земли такими, какими я их представляю.

Автор. Это устаревшее представление. Так изображали магнитосферу Земли до 60-х годов прошлого столетия. Потом началось исследование земной магнитосферы с помощью искусственных спутников Земли, и выяснилось, что магнитное поле нашей планеты *существенно отличается* от поля полосового магнита. Из-за воздействия солнечного ветра магнитосфера Земли оказывается *прижатой* к земному шару с дневной стороны (со стороны Солнца); ее протяженность с этой стороны ограничена десятком земных радиусов, т. е. не превышает примерно 60 000 км. А с ночной стороны она оказывается *отброшенной* от Земли на расстояния, превышающие сотни земных радиусов; ее протяженность с этой стороны порядка миллиона километров.

Читатель. И как же выглядят магнитные линии нашей магнитосферы?

Таблица 6. Линии магнитной индукции магнитосферы Земли



Автор. Они показаны сплошными линиями со стрелками на рисунке 2 в таблице 6. Там же пунктирными линиями со стрелками показаны траектории частиц солнечного ветра. Со стороны Солнца магнитосфера окружена так называемой *переходной областью*, наружная граница которой показана пунктиром. Перед этой областью магнитного поля Земли вообще нет, а позади начинается магнитное поле определенной структуры, представленной сплошными линиями со стрелками на нашем рисунке. В этой структуре четко выделяются две области магнитосферы Земли — *дневная область*, встречающая натиск солнечного ветра, и *ночная область* с весьма длинным «хвостом», который где-то плавно переходит в межпланетное магнитное поле. Что же касается самой переходной области, то можно сказать, что внутри нее магнитное поле Земли существует, но существует в «неорганизованном» виде. Оно здесь нерегулярно меняется и не имеет определенных магнитных линий.

Читатель. Что происходит с частицами солнечного ветра, подлетающими к земной магнитосфере?

Автор. Они могут обогнуть переходную область. Однако, попав в нее, частицы уже оказываются в плену земной магнитосферы. Траектории частиц внутри переходной области перестают быть плавными линиями; они многократно и нерегулярно искривляются. Это продолжается до тех пор, пока частицы не войдут в собственно магнитосферу и не вступят во взаимодействие с регулярными магнитными линиями. Здесь их траектории принимают вид *спиралей, обвивающихся вокруг магнитных линий*.

Читатель. Вы хотите сказать, что электроны и протоны солнечного ветра начинают *обращаться (циркулировать)* вокруг магнитных линий земной магнитосферы?

Автор. Вот именно. В 1892 году выдающийся нидерландский физик, создатель классической электронной теории *Хендрик Антон Лоренц* (1853–1928) показал в своей работе «Электромагнитная теория Максвелла и ее приложение к движущимся телам», что на заряд q , движущийся в электромагнитном поле со скоростью $\mathbf{v}$ будет действовать сила $\mathbf{F}$:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \quad (7)$$

(ныне эту силу называют *силой Лоренца*). Первое слагаемое в (7) — сила, с какой действует на заряд *электрическая* составляющая поля, а второе слагаемое — *магнитная* составляющая. Запись $[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$ есть так называемое *векторное произведение* вектора $\mathbf{v}$ на вектор $\mathbf{B}$; оно представляет собой вектор, модуль которого равен $vB \sin \alpha$ (α — угол между $\mathbf{v}$ и $\mathbf{B}$), а направление перпендикулярно к плоскости векторов $\mathbf{v}$ и $\mathbf{B}$ (вектор $[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$

направлен в сторону поступательного перемещения правого винта, если вращать вектор $\mathbf{v}$ к вектору $\mathbf{B}$).

Читатель. Надо полагать, что сила $(q/c)[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$ есть не что иное, как сила Ампера для случая, когда вместо элемента тока рассматривается движущийся заряд?

Автор. Вы правы. Именно эта сила и заставляет частицы солнечного ветра циркулировать вокруг магнитных линий магнитосферы Земли. Представьте себе прямую магнитную линию. Если вектор $\mathbf{v}$ находится в плоскости, перпендикулярной к этой линии, то заряд будет двигаться по окружности, оставаясь в данной плоскости. Если же у вектора $\mathbf{v}$ есть составляющая, перпендикулярная к указанной плоскости, то заряд будет перемещаться вдоль магнитной линии, продолжая оборачиваться вокруг нее.

Читатель. Вот и получится траектория в виде спирали! Все просто!

Автор. На самом деле все не так просто. Надо иметь в виду, что магнитное поле земной магнитосферы — это *неоднородное поле*. В таком поле магнитные линии в одних местах *сгущаются*, а в других, напротив, становятся реже (это можно видеть на рисунке 2). Там, где система магнитных линий *погуще*, там *индукция магнитного поля больше*. Особенно сильное магнитное поле сосредоточено вблизи магнитных полюсов Земли. Предположим, что заряженная частица влетела в неоднородное магнитное поле Земли и начала двигаться по спирали вокруг некоторой магнитной линии, перемещаясь постепенно из области слабого в область сильного магнитного поля, — так, как это схематически показано на рисунке 3 в таблице 6. Оказывается, что в этом случае спираль будет постепенно скручиваться (ее шаг и радиус будут постепенно уменьшаться). Наступит момент (см. точку *A* на рисунке), когда шаг спирали уменьшится до нуля. С этого момента частица, продолжая движение по спирали вокруг «своей» магнитной линии, начнет перемещаться в обратном направлении вдоль линии — из области сгущения магнитных линий в область, где они разрежены. При этом спираль будет *раскручиваться*.

Читатель. Итак, не достигнув южного магнитного полюса, наша частица отправится в обратный путь и будет перемещаться, крутясь вокруг «своей» магнитной линии, к северному магнитному полюсу?

Автор. Совершенно верно. Она приблизится к северному магнитному полюсу и, не достигнув его, отправится снова к южному магнитному полюсу. Такие перемещения частицы по захватившей ее магнитной линии от одного магнитного полюса Земли к другому и обратно могут совершаться многократно. Получается, что всякий раз, как частица приближается к области с повышенной магнитной индукцией, *магнитное*

поле начинает как бы выталкивать частицу обратно, в область с более низкой магнитной индукцией.

Читатель. Однако это, наверное, не может продолжаться бесконечно долго?

Автор. Это будет продолжаться до тех пор, пока частица солнечного ветра не погибнет вблизи одного из земных полюсов где-то в верхних слоях атмосферы. Кстати, массовую гибель частиц солнечного ветра в верхних слоях атмосферы в приполярных областях можно наблюдать, любуясь картиной *полярного сияния* — лучистыми дугами, полосами, «лентами», «занавесями».

Читатель. Так вот почему возникают полярные сияния!

Автор. В прежние времена высказывалось немало домыслов о природе полярных сияний. Например, в учебнике физики, изданном в XVIII веке, по поводу полярных сияний было записано: «выскакивающие лучи не что иное суть, как зажженные горючие пары». Там же отмечалось, что «материя северного сияния и молнии одинаковая». Но полярные сияния не имеют никакого отношения ни к горению воздуха, ни к молнии. Это свечение — *холодное свечение*. Между прочим, гипотезу о том, что пламень северного сияния не настоящий, а *холодный*, высказал наш великий соотечественник *Михаил Ломоносов*. Вспомним его стихи:

Но где ж, натура, твой закон?
С полных стран встает заря!
Не солнце ль ставит там свой трон?
Не льдисты ль мечут огонь моря?
Се *хладный пламень* нас покрыл.
Се в ночь на землю день вступил...
Как может быть, чтоб мёрзлый пар
Среди зимы рождal пожар?

(Курсив везде наш. — Л.Т.).

В экспериментах с откачанными стеклянными шарами Ломоносов наблюдал *люминесценцию* (свечение), вызванную электрическим разрядом. Полярное сияние — это тоже люминесценция, но обусловленная не разрядом, а *столкновениями протонов и электронов солнечного ветра с атомами и молекулами, находящимися в верхних слоях земной атмосферы*. Все это совершается в приполярных областях на высотах не ниже 100 км (приблизительно от 100 до 500 км).

Читатель. А можно ли нечто подобное наблюдать не на столь больших высотах?

Автор. Примерно то же самое происходит в телевизионной трубке. Быстрые электроны, летящие в вакууме внутри трубки, бомбардируют

изнутри экран телевизора. Атомы специального внутреннего покрытия экрана высвечиваются под воздействием ударов электронов (начинают люминесцировать). Потоками электронов внутри трубки соответствующим образом управляют (с помощью электрических и магнитных полей); поэтому атомы экрана высвечиваются не как попало, а создают на экране различные изображения. Вполне справедливо было бы назвать картину полярных сияний, наблюдаемую на небе, своеобразным телевизионным изображением на «небесном экране», порождаемым космическими пришельцами — частицами солнечного ветра.

Любуясь лучистой полосой полярного сияния, люди обычно не задумываются над тем, что каждый светящийся луч — это светящийся след, оставленный лавиной электронов, спустившихся вдоль магнитных линий магнитосферы Земли до высот в несколько сотен километров. Можно сказать, что вертикальные лучи и вертикальные светящиеся нити лент — все это своеобразная «фотография» магнитных линий нашей магнитосферы.



ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАРТИНЫ МИРА В ДЕВЯТНАДЦАТОМ СТОЛЕТИИ: ОТКРЫТИЕ ОБЩИХ ПРИНЦИПОВ И ДОСТИЖЕНИЯ АТОМИСТИКИ

Принцип сохранения энергии ограничивает течение явлений природы, допуская только превращения энергии, а не созидание или уничтожение ее. Второе начало идет в этом отношении еще дальше и допускает не все виды превращений, а только определенные превращения при определенных условиях.

Макс Планк

5.1 БЕСЕДА, ПОСВЯЩЕННАЯ ДВУМ ОБЩИМ ПРИНЦИПАМ — ПРИНЦИПУ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ПРИНЦИПУ ВОЗРАСТАНИЯ ЭНТРОПИИ

Автор. Как уже отмечалось, к началу XIX века в естествознании (физике, химии, биологии) накопилось большое количество разрозненных

опытных научных фактов, а вместе с ними и гипотез для их объяснения. Огромным достижением науки XIX века явилось *осознание* единства природы электрических, магнитных и оптических явлений, что привело к формированию качественно нового в науке понятия — *физического поля*. Принципиально новые понятия, которые следует именовать *полевыми* (такие, как электрическая напряженность или магнитная индукция), оказались вне сферы привычных механистических представлений и определенно указывали на ограниченность механической картины мира.

Читатель. Об этом был достаточно подробный разговор в теме 15. Именно так и происходил процесс формирования электромагнитной картины мира в XIX-ом веке.

Автор. Кроме *великого объединения* (лучше сказать, *синтеза*) дотоле не связанных друг с другом областей научных исследований, в этом удивительном столетии произошли еще два грандиозных, с точки зрения науки, свершения: открытие двух *общих принципов* и выход в «запретную зону», связанный с исследованием *внутреннего строения атома*.

Читатель. О каких двух общих принципах Вы говорите?

Автор. Поначалу эти два принципа именовались достаточно скромно: *первое начало термодинамики* и *второе начало термодинамики*. Они возникли в рамках *термодинамики* — новой для XIX века науки, вызванной к жизни появлением технических устройств, действующих на основе пара. Термодинамику поначалу рассматривали как теорию тепловых (паровых) машин, которая должна исследовать возможности повышения эффективности этих машин. Основателем термодинамики по праву считается *Сади Карно*, опубликовавший в 1824 году свой знаменитый труд «Размышления о движущей силе огня». Спустя десять лет идеи Карно развил в своем труде «О движущей силе огня» *Эмиль Клапейрон*, разработавший, в частности, графический метод в термодинамике. В истории физики появились уравнения Клапейрона–Менделеева, а также Клапейрона–Клаузиуса. Дальнейшее развитие термодинамики было связано во многом с исследованиями *Рудольфа Клаузиуса*, который в 1850 году сформулировал второе начало термодинамики, а позднее (в 1865 году) ввел в науку понятие энтропии. Не останавливаясь подробнее на истории развития термодинамики (об этом можно прочитать в темах 9 и 10 книги «Вероятность в современном обществе»), отметим лишь, что во второй половине XIX века первое и второе начала термодинамики выступают уже в роли *общих принципов*, выходящих далеко за рамки собственно термодинамики.

Читатель. Наверное, можно сказать, что во второй половине XIX века сама термодинамика вышла за рамки теории тепловых машин и превратилась в общую теорию описания тепловых явлений в веществе?

Автор. Верно. Только в Вашей фразе о «тепловых явлениях в веществе» нужно убрать слово «тепловые». Принципы и понятия термодинамики оказались применимыми не только к тепловым явлениям, но и вообще ко *всем процессам, происходящим в веществе*, включая, в частности, электрические и магнитные. И в первую очередь это относится, конечно, к первому и второму началам термодинамики, которые «превратились», соответственно, в *принцип сохранения энергии* и *принцип возрастания энтропии*. Напомню, что о возрастании энтропии при необратимых процессах в замкнутых системах мы говорили в темах 9 и 10 в книге «Вероятность в современном обществе», так что нет необходимости пояснять суть принципа возрастания энтропии. Итак, наука XIX столетия подарила человечеству два общих принципа, а вместе с ними и два поистине глобальных научных понятия, работающих во всех областях научных знаний, — понятие *энергии* и понятие *энтропии*.

Читатель. Мне казалось, что понятие энергии присутствовало в термодинамике с ее рождения.

Автор. Это не так. Сначала были «теплота» и «работа». При этом предполагалось, что можно говорить о количестве теплоты в теле и что оно определяется количеством содержащегося в теле флюида, именуемого «теплородом». В середине XIX века появились понятия *тепловой энергии* и *механической энергии*. Вскоре к ним добавились *химическая энергия*, *электрическая энергия*, *световая энергия* и другие виды энергии. Тогда же стало ясно, что различные виды энергии могут *превращаться* один в другой — лишь бы *общее количество* энергии не изменялось. Так появился на свет *закон сохранения и превращения энергии*, в рождении которого приняли участие несколько ученых, работавших независимо друг от друга (физики *Майкл Фарадей* и *Джеймс Джоуль*, врачи *Юлиус Майер* и *Герман Гельмгольц*, химик *Герман Гесс* и другие).

Читатель. Поскольку механическая энергия является всего лишь одним из *видов* некоего общего понятия, то не следует ли из взаимной превращаемости видов энергии вывод о том, что все явления *сводимы*, в принципе, к механическим явлениям или, по крайней мере, *могут рассматриваться по аналогии* с механическими явлениями? Иными словами, не указывает ли всеобщность понятия энергии на общность механических представлений?

Автор. Некоторые ученые именно так и полагали. Однако вряд ли можно поддержать их. Можно, например, превратить механическую

энергию в тепловую (это происходит всегда, когда присутствует трение), можно превратить электрическую энергию в механическую (это происходит в электродвигателях), можно превратить химическую энергию в механическую (этим мы все занимаемся во время ходьбы или бега). Процессы превращения одних видов энергии в другие многообразны и происходят повсеместно. Однако это не означает, что можно построить механическую модель накопления энергии в химических связях молекулы АТФ или возникновения радиосигнала, отправляемого радиостанцией во все стороны.

Читатель. Очевидно, что закон сохранения и превращения энергии шире принципа сохранения энергии. А нельзя ли считать, что этот закон, по сути дела, *объединяет оба принципа* — и принцип сохранения энергии, и принцип возрастания энтропии? Ведь при рассмотрении превращения одного вида энергии в другой необходимо принимать во внимание, в каком именно *направлении* происходит превращение. Превращение механической энергии в тепловую возможно всегда, тогда как обратный процесс — превращение тепловой энергии в механическую — сам по себе не происходит. Для этого нужны некоторые условия.

Автор. Конечно, закон сохранения и превращения энергии учитывает как принцип сохранения энергии, так и принцип возрастания энтропии. Учитывает, заметьте, но отнюдь не объединяет. Принцип возрастания энтропии не ограничен рамками проблемы энергообмена между системами. Он выражает принципиально важную истину — существование в природе *необратимых процессов*, которые можно образно называть *процессами с утратой предыстории*. Постановка в научном плане проблемы необратимости процессов состоялась впервые именно в XIX столетии. Приведу в этой связи фразу Макса Планка, которую он произнес в 1909 году, выступая с лекцией на тему «Единство физической картины мира». Планк сказал: *«Мы выразим суть второго начала термодинамики, если скажем, что в природе существуют необратимые процессы»*. И далее: *«В природе нет, в действительности, ни одного обратимого процесса, так как всякий естественный процесс связан в той или иной степени с трением или с теплопроводностью»*.

Читатель. Значит ли это, что сформулированный в XIX столетии принцип возрастания энтропии есть, по сути дела, *принцип необратимости процессов в природе*?

Автор. Фактически принцип возрастания энтропии утверждает *не только* то, что процессы в природе необратимы. После того, как исследованиями Людвиг Бальцмана, Джеймса Максвелла, Джозайи Гиббса была установлена *вероятностная природа принципа возрастания энтропии*, данный

принцип приобрел особенную значимость. Напомню, что в § 10.6 в книге «Вероятность в современном обществе» был сформулирован общий вывод о том, что *в основе необратимых процессов всегда лежит стохастичность*. Иными словами, всякий необратимый процесс по необходимости имеет вероятностную природу. И тут речь идет не о той вероятности, которой прикрывается неполнота наших знаний, а о вероятности фундаментальной, выражающей объективную случайность. *Если все процессы в природе необратимы, то это означает, что при рассмотрении природных явлений надо исходить из фундаментальности не динамических, а вероятностных закономерностей*. Принцип возрастания энтропии по самому большому счету надо рассматривать как *принцип, утверждающий стохастическую (вероятностную) природу процессов в окружающем нас мире*.

Читатель. Получается, что выдвинув принцип возрастания энтропии, научная мысль XIX века вышла тем самым за рамки лапласовского детерминизма?

Автор. А вот этого не получилось. Проблема необратимости, и значит, стохастичности была поставлена, но решение ее в рамках электромагнитной картины мира не состоялось.

5.2 ТЕРМОДИНАМИКА И ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В XVIII веке были изобретены паровые насосы и паровые двигатели. В XIX веке появились пароходы, локомотивы, началось строительство железных дорог. Широкое применение пара потребовало исследования тепловых явлений, в результате возникла и стала быстро развиваться термодинамика (см. тему «Энтропия и термодинамика» в книге «Вероятность в современном обществе»).

Процесс развития термодинамики был фактически *процессом интеграции знаний*. Если в начале века только что родившаяся термодинамика выступала как *механическая теория теплоты*, то на склоне века она представляла собой весьма общую теорию, выходящую за рамки собственно тепловых явлений, приложимую ко всем физическим и химическим процессам, происходящим в веществе. Важным достижением на пути этого процесса интеграции знаний было открытие фундаментального закона природы — *закона сохранения и превращения энергии*.

Приговор теплороду был вынесен, по сути дела, уже в самом конце XVIII века, когда американский естествоиспытатель Бенджамин Рум-

форд (Томпсон) (1753–1814) продемонстрировал закипание воды в сосуде, где производилось сверление канала в металлическом цилиндре. В этом опыте наблюдалось нагревание вследствие трения; работа по сверлению превращалась здесь в теплоту.

Несмотря на это идея теплорода просуществовала еще несколько десятилетий. Любопытно, что основатель термодинамики *Сади Карно* в своем труде «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824) еще пользовался понятием теплорода. Позднее Карно откажется от теплорода и напишет:

«Тепло — это не что иное, как движущая сила, или, вернее, движение, изменившее свой вид. Это движение частиц тел. Повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы. Обратно, всегда при исчезновении теплоты возникает движущая сила. Таким образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве, она никогда не создается, никогда не уничтожается. В действительности она лишь меняет форму, т. е. вызывает то один род движения, то другой...».

Нетрудно усмотреть здесь закон сохранения и превращения энергии — достаточно вместо «движущей силы» поставить «энергию». Заметим, что термин «энергия» был введен в науку *Томасом Юнгом* еще в 1807 году, но прижился не сразу. Под «энергией» Юнг понимал произведение массы тела на квадрат его скорости.

Нельзя не отметить высказанную *Майклом Фарадеем* в 1839 году мысль, что есть много процессов, «при которых форма силы может претерпеть такие изменения, что произойдет явное превращение ее в другую форму; так, можно превратить химическую силу в электрическую или электрическую в химическую. Но ни в одном случае нет чистого сотворения силы, нет производства силы без соответствующего израсходования чего-либо, что питает ее». И опять-таки поставьте здесь вместо «силы» «энергию» — и вы получите закон сохранения и превращения энергии.

Надо признать, что, к сожалению, термин «сила» часто использовался в те времена отнюдь не в том смысле, какой ему придал *Исаак Ньютон*. Напомним слова Ньютона: «Сила проявляется единственно только в действии и *по прекращении действия в теле не остается*» (курсив наш. — Л.Т.). Принципиальное отличие силы от энергии в том, что силу сохранить (накопить) нельзя, тогда как энергия сохраняется, и возможно накопление одного вида энергии за счет превращения других ее видов.

Исторически открытие закона сохранения и превращения энергии связывают с именами немецкого естествоиспытателя и врача *Юлиуса Роберта Майера* (1814–1878), английского физика *Джеймса Прескотта*

Джоуля (1818–1889) и немецкого ученого и врача *Германа Людвигу Фердинанда Гельмгольца* (1821–1894). К открытию они пришли разными путями.

Майер шел от медицинских наблюдений. Интересны его записи, которые он сделал после своего путешествия на Яву:

«Летом 1840 года, пуская кровь на Яве новоприбывшим европейцам, я заметил, что взятая из плечевой вены кровь имеет почти всегда поразительно яркую окраску (обычно же венозная кровь весьма темная. — *Л.Т.*). Это явление приковало мое внимание. Исходя из теории Лавуазье, согласно которой животная теплота есть результат процесса горения, я рассматривал двоякое изменение окраски, испытываемое кровью в капиллярах малого и большого круга кровообращения как видимое следствие происходящего в крови окисления. Для поддержания температуры человеческого тела образование теплоты в нем должно находиться в некотором количественном отношении к потере им теплоты, а значит, также к температуре среды; поэтому как образование теплоты в процессе окисления, так и разница в окраске обоих видов крови должна быть в жарком поясе слабее, чем в более холодных странах».

Обратим внимание на то, что «образование теплоты» в организме, происходящее в процессе окисления, должно быть определенным образом *сбалансировано* с «потерей теплоты» организмом, Майер тем самым фактически *исключал* из игры еще один флюид — так называемую жизненную силу. Физиологические процессы обуславливаются не таинственной жизненной силой, а *физико-химическими процессами*, подчиняющимися закону сохранения и превращения энергии.

Свои наблюдения, идеи, выводы Майер изложил в работе «О количественном и качественном определении сил» (под «силой» здесь надо понимать энергию). В 1841 году он направил эту работу в «Анналы» Поггендорфа. Как мы уже говорили, работа пролежала в столе редактора до самой его смерти. Через несколько лет Майер изложил свои идеи в брошюре, которую выпустил в свет за свой счет.

Майер рассматривал различные виды энергии: *кинетическую* («живая сила движения»), *потенциальную* («сила падения»), их сумму — *механическую* энергию («механический эффект»), а также *тепловую, электрическую, химическую* энергию (называя их соответствующими «силами»). Он считал, что все эти виды могут взаимопревращаться — при условии неизменности общего количества энергии. Он полагал, что жизнь на Земле, круговорот воды, движения воздушных масс — все это обеспечивается, в конечном счете, *энергией солнечного излучения*. Он писал:

«Природа поставила перед собой задачу поймать на лету льющийся на Землю свет и накопить самую подвижную силу, приведя ее в неподвижное состояние.

Для достижения этой цели она покрыла земную кору организмами, которые, живя, поглощают солнечный свет и при использовании этой силы порождают непрерывно возобновляющуюся сумму химических различий. Этими организмами являются растения».

Джоуль пришел к великому открытию иным путем. Вначале он заинтересовался выделением тепла в проводе, по которому течет электрический ток (ныне во всех учебниках физики рассматривается *закон Джоуля–Ленца*: количество теплоты, выделяемой в проводнике с током, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока). Это побудило Джоуля заняться изучением связи между теплотой и работой. В работе «О тепловом эффекте магнитоэлектричества и механическом эффекте теплоты» (1843) он делает вывод: «Во всех случаях, когда затрачивается механическая сила (надо читать «механическая работа». — *Л.Т.*), получается точное эквивалентное количество теплоты». Два года спустя Джоуль выполняет достаточно точные измерения *механического эквивалента теплоты*.

Гельмгольц, как и Майер, пришел к выводу о сохранении энергии, рассматривая физиологические тепловые явления (1847). Он выразил полученный закон в математической форме. В отличие от предшественников, Гельмгольц связал закон сохранения энергии с *принципом невозможности создания вечного двигателя*. Отметим также, что Гельмгольц разработал термодинамическую теорию химических процессов.

С открытием закона сохранения и превращения энергии *приобретает глубокий и общий смысл первое начало термодинамики*: система может обмениваться энергией с окружающей средой несколькими способами (как говорят, по нескольким каналам), из которых наиболее важны два — через теплопередачу и через совершение работы. Изменение внутренней энергии системы определяется *балансом энергий*, полученных (отданных) системой по всем каналам. Теперь, естественно, встал вопрос о *направлении* передачи энергии по тому или иному каналу (к системе или от системы). Рассмотрение этого вопроса привело к появлению *второго начала термодинамики* и новой величины, оказавшей столь же фундаментальной и общезначимой, как и энергия. Мы имеем в виду *энтропию* — величину, которой в книге «Вероятность в современном обществе» были посвящены тема 9 («Энтропия и термодинамика»), тема 10 («Энтропия, вероятность, информация») и тема 11 («Энтропия и жизнь»). Там же мы достаточно подробно рассмотрели второе начало термодинамики.

В заключение заметим, что успехи термодинамики приводили, как это не раз случалось в науке, к *абсолютизации* достигнутого уровня понимания природы. Так, они привели к появлению так называемой *энергетической концепции*. «Энергетисты» (выделим среди них немецкого физика и философа *Вильгельма Фридриха Оствальда* (1853–1932)) полагали, что все сводится к энергии и что кроме превращений энергии в мире ничего не совершается. В частности, они отвергали реальность атомов и молекул. А между тем именно на пути развития атомистики получили физическое объяснение многие понятия термодинамики, была понята физическая природа второго начала термодинамики.

5.3 МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА И МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ

Первое достаточно убедительное, хотя и косвенное доказательство того, что вещество действительно построено из молекул, получил известный английский химик и физик *Джон Дальтон* (1766–1844). В 1803 году он открыл *закон кратных отношений*: при образовании химических соединений массы реагирующих веществ находятся в строго определенных и притом кратных отношениях. Например, при образовании воды отношение масс прореагировавших газов водорода и кислорода равно 1 : 8. Это можно понять, если только считать, что при образовании молекулы воды определенное число атомов водорода соединяется с определенным числом атомов кислорода.

Следует обратить внимание читателя на тот факт, что именно гипотеза о существовании молекул (об атомно-молекулярном строении вещества) позволяет объяснить смысл фразы: «при соединении водорода и кислорода образуется вода». Неискушенный человек вправе задать вопрос: Как может быть, чтобы при соединении двух газов возникла вода? Мы привыкли придавать механистический смысл термину «соединение»; соединение двух объектов означает их сложение, объединение в нечто единое, общее. Что же скрывается в рассматриваемом случае под словом «соединение»? Ответ на этот вопрос дается на атомно-молекулярном уровне: при химическом соединении водорода и кислорода происходят многократные процессы, в каждом из которых *две молекулы водорода соединяются с одной молекулой кислорода, в результате чего образуются две молекулы воды*. Масса молекулы кислорода в 76 раз больше массы молекулы водорода; отсюда и получается указанное выше кратное отношение масс реагентов, равное 1 : 8.

В 1811 году известный итальянский физик и химик *Амедео Авогадро* (1776–1856) установил закон, который ныне называют *законом Авогадро*: равные объемы газов при одинаковых давлениях и одинаковых температурах содержат одно и то же число молекул. Отметим, что в начале 70-х годов XIX столетия трудами ряда исследователей было найдено число молекул в моле любого вещества. Это число называют *постоянной Авогадро* в честь итальянского ученого; оно равно $6 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

В 1857 году в «Анналах» Поггендорфа появилась статья знаменитого немецкого физика *Рудольфа Юлиуса Эмануэля Клаузиуса* (1822–1888) «О роде движения, которое мы называем теплотой». Это тот самый Клаузиус, который в 1865 году ввел в науку понятие «энтропия». В указанной статье Клаузиус изложил, по сути дела, основы *молекулярно-кинетической теории газов*.

Клаузиус рассматривал не только поступательное и вращательное движения молекул в газе, но также колебания атомов внутри молекул. Он ввел понятие *идеального газа*, определив его как газ, у которого «во-первых, молекулы настолько малы, что их объемом можно пренебречь по сравнению с объемом, занимаемым всем газом, и, во-вторых, молекулы проявляют силы взаимодействия, лишь находясь в непосредственной близости друг от друга». (Современное, более общее определение идеального газа: газ, у которого энергия взаимодействия молекул пренебрежимо мала по сравнению с их кинетической энергией. Иначе говоря, это есть газ, полная энергия которого равна сумме энергий составляющих его частиц.) Заметим, что движение самих молекул Клаузиус рассматривал в соответствии с законами классической механики: от столкновения до столкновения молекулы движутся равномерно и прямолинейно.

Осознание того факта, что коллектив молекул газа должен описываться *вероятностными (статистическими)* закономерностями, являлось, безусловно, важным достижением атомистики XIX столетия. Даже несмотря на то, что имела в виду *субъективная* случайность, иначе говоря, случайность, обусловленная *неполнотой наших знаний*, связанной с обилием частиц, движущихся по ньютоновским законам. В 1859 году *Джеймс Максвелл* получил первую в истории физики *функцию распределения*, описывающую вероятность молекулам иметь то или иное значение скорости (точнее говоря, не вероятность, а плотность вероятности), — знаменитое *распределение Максвелла*. Вероятность, с которой до этого работали только математики (если не учитывать сугубо персоналистский подход к вероятности, при котором ее пытались применять даже в судебных процессах), теперь проникла в сферу физики.

Идеи Максвелла получили дальнейшее развитие в работах *Людвига Больцмана*. Во второй половине 70-х годов XIX столетия Больцман обобщил максвелловский закон распределения, рассмотрев газ во внешнем поле. Он применил статистический метод к термодинамике, дал статистическое обоснование второго начала термодинамики, выразил энтропию через вероятность макросостояний системы (знаменитая *формула Больцмана*).

Так зародилась *статистическая физика*. Она станет *идеологической основой естествознания XX столетия*. Однако во времена Максвелла и Больцмана вряд ли кто догадывался об этом. В формировавшейся в конце XIX века электромагнитной картине мира не было места статистическим представлениям. Создатели молекулярно-кинетической теории газов полагали, что каждая молекула ведет себя в соответствии с законами механики Ньютона, т. е. жестко детерминировано. Подобно Лапласу они *не преодолели привычки видеть за вероятностями однозначные закономерности*.

5.4 ЕСТЬ ЛИ У АТОМА ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА И КАКОВА ОНА?

5.4.1. Три первых шага на подступах к проблеме структуры атома. Сразу подчеркнем, что к проблеме *структуры атома* ученые весьма долгое время (более двух тысяч лет) и не думали подступаться. По той простой причине, что сама постановка такой проблемы представлялась абсурдной. Атом появился в науке как *неделимый объект*; его неделимость была органически связана с его предельной элементарностью. А если атом есть неделимый объект, то не имеет смысла вопрос о том, *как он устроен внутри*. Можно обсуждать размеры атома, его форму, поведение в различных условиях, характер взаимодействия с другими атомами или физическими полями, но нельзя обсуждать внутреннюю структуру атома, коль скоро таковой просто не может быть. Эта парадигма владела сознанием атомистов, начиная с атомистов античности и вплоть до атомистов XVIII–XIX столетий.

Именно поэтому представляют особый интерес три открытия, сделанные в XIX столетии, которые мы рискнули назвать *тремя первыми шагами на подступах к проблеме структуры атома*.

Первое открытие произошло в 1814 году. Немецкий физик *Йозеф Фраунгофер* (1787–1826), исследуя спектр, получаемый при преломлении солнечных лучей, обнаружил, что сплошной солнечный спектр

покрыт *весьма узкими черными линиями*. Длины волн, соответствующие этим линиям, оставались неизменными при каждом наблюдении. Ныне эти линии называют *фраунгоферовыми линиями*.

Обнаружение указанных линий могло бы послужить импульсом к тому, чтобы уже в начале XIX века состоялось одно из величайших научных открытий века — открытие *спектрального анализа*. Однако открытие спектрального анализа произошло почти полвека спустя — в 1859 году. И это есть второе из рассматриваемых нами трех открытий. Его сделали видные ученые — немецкий физик *Густав Роберт Кирхгоф* (1824–1887) и немецкий химик *Роберт Вильгельм Бунзен* (1811–1899). Они пропускали через призму излучение светящихся паров различных металлов (лития, натрия, калия, кальция, стронция, бария) и фиксировали для каждого металла присущий только данному химическому элементу набор узких цветных линий (*спектральных линий испускания*). Ученые сделали вывод: «...разнообразие соединений, в которые входили исследуемые металлы, разнообразие процессов, происходивших в различных пламенах горелки, огромный интервал температур — все это не оказывает никакого влияния на положения спектральных линий отдельных металлов». Стало ясно, что линейчатый спектр испускания индивидуален для каждого химического элемента и может рассматриваться как своего рода *физический паспорт элемента*. Как подчеркивал Кирхгоф, «найден путь определять химический состав солнечной атмосферы и тот же путь обещает дать возможность делать некоторые заключения о химическом составе ярких звезд».

Как правило, светящиеся объекты испускают сплошные спектры. Это относится не только к твердым и жидким телам, но и к относительно плотным газам. Линейчатые спектры испускают лишь достаточно разреженные газы и пары. Практически все звезды испускают, подобно Солнцу, сплошные спектры. Возникает вопрос: как быть в этом случае с анализом химического состава той или иной звезды?

Никакой особой проблемы тут нет. Дело в том, что если излучение со сплошным спектром пропустить сначала через разреженный газ какого-то вещества и лишь потом через призму, то в этом случае на фоне сплошного спектра будут наблюдаться темные линии (*спектральные линии поглощения*), положения которых на шкале длин волн будут *повторять* положения спектральных линий испускания химических элементов, входящих в состав разреженного газа. Допустим, излучение со сплошным спектром пропускают через пары лития, а потом через призму. На экране будет наблюдаться сплошной спектр с неким набором темных линий — линейчатый спектр поглощения лития. Подчеркнем,

что в линейчатом спектре поглощения темные линии находятся в тех же местах спектра, где наблюдались бы спектральные линии испускания лития (если бы пары лития светились). Светящиеся пары лития испускают малиновую и оранжевую линии; несветящиеся пары лития «поглощают» из сплошного спектра те же самые линии — малиновую и оранжевую.

Именно *линейчатые спектры поглощения* позволяют анализировать химический состав звезд. Поверхность звезды испускает излучение со сплошным спектром; это излучение проходит сквозь разреженные верхние слои атмосферы звезды, и там из сплошного спектра *выбывают* соответствующие спектральные линии. По ним-то мы и судим о химическом составе атмосферы звезды, а значит, и самой звезды. Фраунгоферовы линии в сплошном спектре Солнца — это и есть *линейчатый спектр поглощения солнечной атмосферы*.

Наконец, укажем третье открытие. Оно состоялось в 1869 году. Мы имеем в виду открытие знаменитым российским химиком *Дмитрием Ивановичем Менделеевым* (1834–1907) фундаментального закона — *периодической системы химических элементов*. Менделеев не только установил периодичность физических и химических свойств элементов как функцию их атомного веса, но и вывел некоторые принципы, позволившие *предсказать* ряд новых, пока еще не открытых химических элементов. В то время было известно 63 элемента. Пользуясь принципом *атоманалогии* (сходства элементов в пределах ряда и группы), Менделеев предсказал некоторые новые элементы и описал их свойства. Так, были предсказаны открытый в 1879 году скандий (Менделеев называл этот элемент экабором), открытый в 1875 году галлий (экаалюминий), открытый в 1886 году германий (экасилиций).

Конечно, указанные нами три открытия (особенно последние два) исключительно важны. Но почему их можно рассматривать как три первых шага на подступах к проблеме структуры атома? Это нетрудно объяснить. Каждому химическому элементу соответствует свой тип атомов. Открытие спектрального анализа Кирхгофом и Бунзеном, равно как и состоявшееся раньше открытие Фраунгофера показали, что атомы каждого химического элемента высвечивают (и, соответственно, поглощают) определенные спектральные линии, наборы которых индивидуальны для каждого элемента. *Причиной высвечивания атомом излучения, а также причиной поглощения атомом излучения может быть лишь некоторая внутренняя структура атома*. Какие-то движения внутри атома обуславливают испускание и поглощение им света. Более того, у ато-

мов каждого конкретного химического элемента должна быть не просто внутренняя структура, а своя *собственная* структура, присущая данному элементу и не присущая другим элементам.

Когда Менделеев представил в марте 1869 года Русскому химическому обществу свое сообщение, озаглавленное «Соотношение химических свойств с атомным весом элементов», он, разумеется, не знал, что наблюдаемая периодичность свойств химических элементов *определяется соответствующими закономерностями в строении атома*; однако он, безусловно, догадывался о существовании и принципиально важной роли строения атома. Недаром Менделеев считал нужным подчеркнуть, что, по его мнению, «величина атомного веса определяет природу элемента настолько же, насколько масса частицы определяет свойства и многие реакции сложного тела». Как видим, ученый проводил параллель между химическим элементом и «сложным телом», между природой элемента и свойствами «сложного тела».

Здесь уместно отдать должное еще одной личности, которую современники не поняли и не оценили. Всего через год после открытия Франгофера, в 1815 году английский врач и химик *Уильям Праут* (1785–1850) высказал гипотезу, согласно которой внутренняя структура у атома есть. Согласно этой гипотезе атомы разных элементов состоят из соответствующего их атомному весу количества атомов водорода. Сегодня нам понятно, что гипотеза Праута ошибочна. Однако следует признать, что она в какой-то мере созвучна современным представлениям об атомном ядре, состоящем из определенного (разного для ядер разных элементов) количества нейтронов и протонов. Последние, как известно, представляют собой ядра атомов водорода.

5.4.2. Открытие электрона. Идея о существовании *атома электричества* берет начало в фарадеевских законах электролиза. Джеймс Максвелл также пришел к идее элементарного заряда, который он называл «молекулой электричества». Он писал, что «теория молекулярных зарядов может служить для выражения большого числа фактов электролиза», и в то же время утверждал, что «маловероятно, чтобы к тому времени, когда мы познаем истинную природу электролиза, мы сохраним хоть что-нибудь из теории молекулярных зарядов. Тогда у нас будет твердая основа для того, чтобы создать истинную теорию электрического тока и освободиться от этих представлений». Как видим, Максвелл полагал, что со временем полевые представления полностью вытеснят представления о дискретных зарядах. Заряды, полагал он, будут рассматриваться только как особые (узловые) *точки поля*.

Одним из решительных защитников представления об атомности электричества был ирландский физик *Джонсон Стоней* (1826–1911). Вот что он говорил на съезде Британской ассоциации в Белфасте в 1874 году:

«Природа дает нам, наконец, одно, вполне определенное количество электричества, не зависящее от рассматриваемых тел. Чтобы выяснить это, я формулирую закон Фарадея в следующих выражениях, которые, как я покажу, придадут ему ясность. На каждую химическую связь, разорванную внутри электролита, приходится определенное, всегда одинаковое количество электричества, прошедшее через электролит. Это определенное количество электричества я назову E_1 . Если мы примем его за единицу электричества, мы, вероятно, сделаем большой шаг в изучении молекулярных явлений».

Именно с упомянутой величиной E_1 Стоней связал введенное им позднее (в 1891 году) понятие «электрон». Так он назвал заряд одновалентного отрицательного иона.

Идею об атомности электричества весьма четко выразил в 1881 году Гельмгольц: «Если мы допускаем существование химических атомов, то должны заключить отсюда, что и электричество, как положительное, так и отрицательное, разделяется на определенные элементарные количества, которые играют роль атомов электричества».

Электроны были экспериментально обнаружены в *катодных трубках* — идеально откачанных стеклянных баллонах с положительно заряжаемым электродом (анодом) и отрицательно заряжаемым электродом (катодом). Сегодня эти трубки предстают перед нами в образе электронно-лучевых трубок (проще говоря, телевизионных трубок). Сегодня мы имеем дело с управляемыми посредством полей электронными пучками в этих трубках, а в конце XIX столетия физики имели дело, работая с катодными трубками, с так называемым *катодным излучением* и до некоторого времени не знали, что катодное излучение как раз и есть поток электронов.

Выполнив в 1895 году ряд остроумных опытов с катодными лучами в трубках специальной конструкции, молодой французский физик *Жан Батист Перрен* (1870–1942) надежно установил, что катодные лучи — это вовсе не какое-то четвертое («ультрагазообразное») состояние вещества и не молекулы остаточного газа, содержащегося в трубке, а отрицательно заряженные частицы. В 1897 году выдающийся английский физик *Джозеф Джон Томсон* (1856–1940), изучая отклонение катодных лучей в электрическом и в магнитном полях, измерил отношение заряда к массе для частиц этих лучей. Можно считать, что именно в результате измерений, выполненных Томсоном, и состоялось *открытие электрона*. Сегодня нам известно, что электрон — это носитель наименьшей

массы и наименьшего электрического заряда в природе. Его масса равна $0,91 \cdot 10^{-27}$ г. Он заряжен отрицательно и имеет заряд $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Электрон — стабильная частица; относится к классу *лептонов*.

5.4.3. И снова к вопросу о структуре атома: атомы по Томсону и атомы по Резерфорду. В конце XIX столетия идея *наличия у атома внутренней структуры*, что называется, «*житала в воздухе*». Толчком к созданию первой физической модели атома явилось открытие электрона. И вот в 1903 году человек, открывший электрон, *Джозеф Томсон* предложил *модель атома* в виде положительно заряженной по объему сферы диаметром около 10^{-8} см, внутри которой как бы «*вкраплены*» электроны (что-то вроде пудинга с изюмом). Когда электроны-изюминки колеблются относительно центра сферы, атом, подобно вибратору Герца, излучает свет. В простейшем атоме (атоме водорода) электрон в отсутствие излучения атома находится точно в центре положительно заряженной сферы. В многоэлектронных атомах электроны расположены в соответствии с конфигурациями, рассчитанными Томсоном. Каждая такая конфигурация определяет химические свойства соответствующего химического элемента. Томсон даже предпринял попытку объяснить с помощью предложенной модели атома периодическую систему элементов Д.И. Менделеева.

В 1908–1911 годах были выполнены ставшие знаменитыми эксперименты английского физика *Эрнеста Резерфорда* (1871–1937), продемонстрировавшие несостоятельность томсоновской модели атома. Эти эксперименты указывали на то, что структура атома должна быть совсем иной. В экспериментах Резерфорда изучалось прохождение α -частиц (атомных ядер гелия) сквозь тонкую металлическую фольгу. В то время уже было открыто явление *радиоактивности* — самопроизвольное превращение неустойчивых атомных ядер в ядра других элементов, сопровождающееся испусканием либо α -частиц (использовался термин « α -распад»), либо электронов (« β -распад»), либо γ -квантов электромагнитного излучения (« γ -распад»). Заметим, что явление радиоактивности впервые обнаружил в 1896 году известный французский физик *Антуан Анри Беккерель* (1852–1908), исследуя соли урана. Были известны несколько химических элементов, которые самопроизвольно испускали α -частицы, — полоний, радий, радон; их использовали как источники α -частиц.

На рисунке 1 в таблице 7 схематически показано, как проводились опыты Резерфорда. Пучок α -частиц пропусклся сквозь фольгу, вокруг которой находился специальный экран. На нем всякий раз возникала вспышка в том месте, куда попадала α -частица. Наблюдая вспышки, можно было судить, как изменилось направление движения той или иной α -частицы при прохождении через фольгу.

Атомы фольги должны были рассеивать α -частицы; ожидалось, что будет наблюдаться примерно такая картина, как показано на рисунке 2 в таблице 7. Однако опыт обнаружил совершенно иную и притом довольно неожиданную картину — см. рисунок 3 в таблице 7. Почти все α -частицы свободно пролетали сквозь фольгу (словно пули сквозь слой соломы), а некоторые частицы, *примерно одна из десяти тысяч*, резко отскакивали назад, — как если бы пуля вдруг наткнулась внутри соломы на что-то очень массивное. Это массивное тело должно быть очень малых размеров — ведь лишь одна из десяти тысяч «пуль» натыкалась на него.

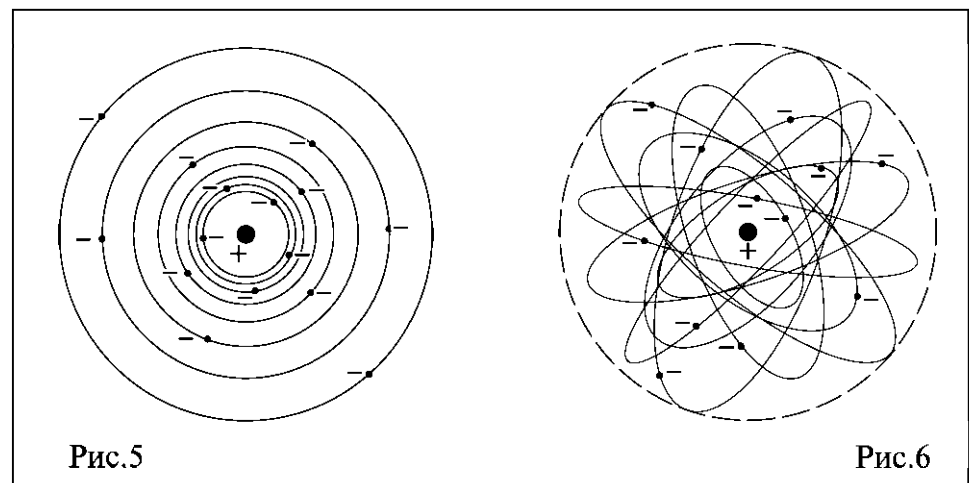
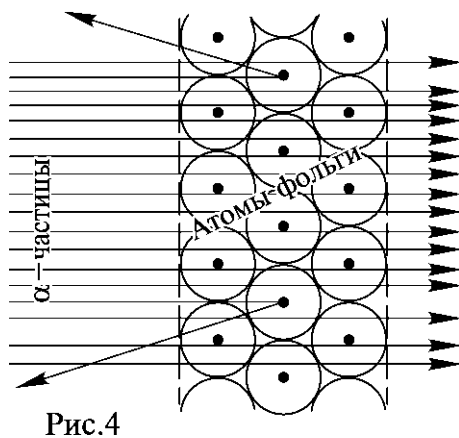
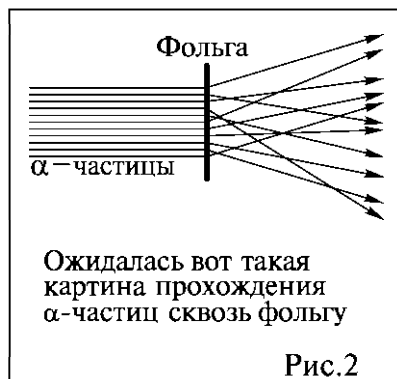
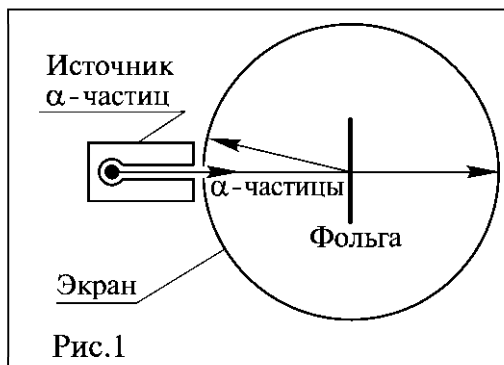
Итак, почти вся масса атома сосредоточена в очень малой по объему центральной области (в положительно заряженном *атомном ядре*), а остальной объем, т. е. практически *весь объем атома*, предоставлен *электронам* — см. рисунок 4 в таблице 7 (здесь атомные ядра показаны маленькими черными кружочками, которые на самом деле должны были бы выглядеть еще более малыми — ведь диаметр ядра в 100 000 раз меньше диаметра самого атома). Для α -частиц атомы в целом оказываются как бы пустыми, поскольку масса α -частицы примерно в 8000 раз больше массы электрона.

В результате у Резерфорда вырисовывалась модель атома, напоминающая систему планет. Электроны подобно неким миниатюрным планетам движутся по круговым орбитам вокруг массивного ядра — см. рисунок 5 в таблице 7. Такова *планетарная модель атома*. Впрочем, нет оснований считать, что все электроны движутся в *одной и той же* плоскости, так что изображенную на рисунке 5 *плоскую* картину электронных орбит логичнее заменить на *объемную* картину, в которой круговые электронные орбиты будут выглядеть как эллипсы — см. рисунок 6 в таблице 7. Именно в таком виде принято обычно изображать атом.

НЕЗАПЛАНИРОВАННЫЙ ДИАЛОГ

Читатель. Лукреций говорил, что нельзя бесконечно дробить тело, ибо в конечном счете все раздробится на атомы, а дальше дробление принципиально невозможно, коль скоро атомы неделимы. Однако атомы оказались делимыми. Значит, процесс дробления можно, в принципе, продолжать дальше. Почему бы тогда и вправду не считать атом миниатюрной «Солнечной системой»? Электроны могли бы представляться планетами в этой системе.

Таблица 7. Модель атома по Резерфорду



Автор. В 1922 году поэт *Валерий Яковлевич Брюсов* (1873–1924) написал вот такие любопытные стихи:

Быть может, эти электроны —
Миры, где пять материков,
Искусства, знания, войны, троны
И память сорока веков!
Еще, быть может, каждый атом —
Вселенная, где сто планет;
Там все, что здесь, в объеме сжатом,
Но также то, чего здесь нет.
Их меры малы, но все та же
Их бесконечность, как и здесь;
Там скорбь и страсть, как здесь, и даже
Там та же мировая спесь.
Их мудрецы, свой мир бескрайний
Поставив центром Бытия,
Спешат проникнуть в искры тайны
И умствуют, как ныне я;
А в миг, когда из разрушенья
Творятся токи новых сил,
Кричат, в мечтах самовнушенья,
Что Бог свой светоч загасил!

Читатель. Как видите, и поэт так думал!

Автор. Думаю, поэта мало интересовали естественнонаучные проблемы. Разве не чувствуется скрытая ирония по поводу того, что каждый хотел бы «свой мир бескрайний» поставить «центром Бытия»? И что повсюду те же скорбь и страсть и «та же мировая спесь»? Здесь много глубокого по содержанию подтекста. Взять хотя бы фразу о том, что «из разрушенья творятся токи новых сил».

Читатель. А если все-таки попробовать взглянуть на эти стихи с точки зрения науки?

Автор. А с точки зрения науки никакие миниатюрные «вселенные» принципиально невозможны. Этого, как говорится, не разрешают законы природы. *Природу нельзя уподоблять матрешкам, вставленным одна в другую.*

Читатель. Но почему?

Автор. *Природа инвариантна по отношению к преобразованию подобия.* Это уже отмечалось в § 1.5. Об этом же говорилось в § 3.6 в связи с рассмотрением ограниченности механической картины мира, в которой предполагалось, что микромир подобен макромиру и что, по выражению Лапласа, «кривая, описанная простою молекулой, определена

так же точно, как и орбиты планет». Рассуждая об атомах, ученые различных веков делали одну и ту же ошибку — они рассматривали атомы просто как очень маленькие тельца, отличающиеся от обычных тел лишь размерами, а в остальном ведущие себя *подобно обычным телам*. Однако атомы — не просто маленькие тельца; это *принципиально иные* объекты. Они подчиняются своим законам движения, существенно отличающимся от законов движения обычных тел, т. е. от законов ньютоновской механики.

Читатель. А в чем это проявляется?

Автор. Во многом. Вот мы только что говорили об орбитах электронов в атомах. А ведь *в действительности не существует никаких электронных орбит*.

Читатель. Как это так? А все эти изображения атомов?

Автор. Их не надо воспринимать буквально. В действительности же просто не имеет смысла говорить о *траектории* электрона в атоме. Ни о круговой, ни о какой-либо иной.

Читатель. Получается, что не только томсоновская модель атома, но также и планетарная модель Резерфорда никуда не годится?

Автор. Я бы не стал говорить, что планетарная модель атома никуда не годится. Она правильно отражает тот факт, что почти вся масса атома сосредоточена в крошечном ядре, а практически весь объем атома предоставлен электронам. Но, разумеется, движение электронов в атоме не имеет ничего общего с движением планет вокруг Солнца. Лукреций беспокоился, как «отличить мельчайшую вещь от Вселенной». Он считал, что в этом поможет неделимость атома. Сегодня мы могли бы очень просто успокоить Лукреция. Отличить мельчайшую вещь от Вселенной совсем нетрудно — *они подчиняются разным законам природы*.

Читатель. Но как же, все-таки, представлять движение электронов в атоме?

Автор. Об этом у нас будет достаточно обстоятельный разговор в свое время. Он будет в контексте формирования современной естественнонаучной картины мира.

5.5 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ КАРТИНА МИРА

Известный российский специалист по истории физики *Павел Степанович Кудрявцев* (1904–1975) в своем «Курсе истории физики» (М.: «Просвещение», 1982) пишет:

«Эйнштейн сравнивал имена Галилея и Ньютона в механике с именами Фарадея и Максвелла в науке об электричестве. Действительно, аналогия здесь вполне

уместна. Галилей положил начало механике, Ньютон ее завершил. Оба они отпавлялись от системы Коперника, ища ее физическое обоснование, которое, в конце концов, и было найдено Ньютоном.

Фарадей по-новому подошел к изучению электричества и магнитных явлений, указывая на роль среды и вводя концепцию поля, описываемого им с помощью силовых линий. Максвелл придал идеям математическую завершенность, ввел точный термин «электромагнитное поле», которого еще не было у Фарадея, сформулировал математические законы этого поля.

Галилей и Ньютон заложили основы механической картины мира, а Фарадей и Максвелл — основы электромагнитной картины мира».

Действительно, электромагнитная картина мира формировалась во второй половине XIX столетия прежде всего на основе исследований в области электромагнетизма, в которых решающую роль сыграли *Майкл Фарадей* и *Джеймс Максвелл*, развившие понятие *физического поля*. Сначала на смену *механической* модели эфира пришла *электромагнитная* модель (электрическое, магнитное, электромагнитное поля трактовались первоначально как разные «состояния» эфира). Позднее, уже в начале XX века, *необходимость в каком-либо эфире отпала*; пришло понимание того, что электромагнитное поле само есть *определенный вид материи*, так что для распространения его в пространстве не требуется какая-то специальная среда (эфир).

Электромагнитная картина мира формировалась не только в XIX веке; она продолжала формироваться также в течение трех десятилетий XX века. Поэтому она использовала не только учение об электромагнетизме и достижения атомистики, но также некоторые идеи современной физики (идеи теории относительности и квантовой механики). Итак, отметим основные черты электромагнитной картины мира, сложившейся в первой четверти XX столетия.

Согласно этой картине материя существует в двух видах — в виде *вещества* и в виде *поля*. Между указанными видами имеется непреходимая грань: *вещество не превращается в поле, поле не превращается в вещество*. Известны два типа физических полей — *электромагнитное* и *гравитационное*. Соответственно, есть *два фундаментальных взаимодействия* — *электромагнитное* и *гравитационное*. Электромагнитное взаимодействие ответственно не только за электрические и магнитные явления, но и за ряд других явлений, например, оптические, тепловые, химические. Произошла смена тенденций: если в XVIII столетии превалировала тенденция свести все к механике, к механическим явлениям, к механическим моделям, то теперь на первый план выходит тенденция *свести все к электромагнетизму*. Включая и некоторые меха-

нические явления, например, трение и упругость. Вне сферы господства электромагнетизма остается, по сути дела, только тяготение.

В качестве элементарных «кирпичиков», из которых построена вся материя, рассматриваются всего три частицы: *электрон*, *протон* и *фотон*. Фотоны — «кирпичики» (иными словами, «зерна», кванты) электромагнитного поля. Появившаяся в 20-х годах XX столетия концепция *корпускулярно-волнового дуализма* (о ней мы поговорим в теме 19) «примиряет» волновую природу электромагнитного поля с представлением электромагнитного излучения в виде потока летящих со скоростью света фотонов. Надо признать, что фотоны появились в электромагнитной картине мира в качестве своеобразных «пришельцев», фактически не вписывающихся в данную картину. Исследуя проблему *теплового излучения* (электромагнитного излучения, испускаемого любым веществом за счет внутренней энергии), Макс Планк пришел в 1900 году к гипотезе о прерывистости процесса испускания излучения телами. Изучая *фотоэффект*, Альберт Эйнштейн в 1905 году предположил, что излучение не только испускается, но и поглощается прерывисто. В 1916 году он ввел в рассмотрение порции самого излучения (*световые кванты*), обладающие не только определенными энергиями, но и определенными импульсами. С 1926 года световые кванты Эйнштейна стали называть *фотонами*.

Элементарными «кирпичиками» вещества являются *электроны* и *протоны* (ядра атома водорода). Заряд протона равен заряду электрона; но, в отличие от последнего, имеет положительный знак; его масса в 1836 раз больше массы электрона. Вещество состоит из молекул, молекулы образованы из атомов, атом имеет массивное ядро, которое окружено электронами, составляющими так называемую «электронную оболочку» атома. Термин «оболочка» здесь не вполне удачен, поскольку электроны «занимают» фактически весь объем атома; этот объем примерно в 70 раз больше объема атомного ядра. Атомное ядро «собрано» из протонов и (как тогда считали) своеобразных *дублетов* — компактных соединений из протона и электрона. Например, ядро гелия (α -частица), как полагали, образовано двумя протонами и двумя дублетами, т. е. содержит в себе 4 протона и 2 электрона. Получалось, что в атоме гелия находятся 4 электрона — 2 электрона внутри ядра (в дублетах) и 2 электрона в электронной оболочке. При таком взгляде на структуру атома все силы, действующие в веществе, *сводились к электромагнитным* — в полном соответствии с идеологией электромагнитной картины мира. Эти силы отвечают за межмолекулярные и межатомные связи (т. е. за химические связи); они же удерживают электроны электронной оболочки вблизи

ядра атома; более того, эти же силы обеспечивают прочность атомного ядра. И электрон, и протон — стабильные частицы (они не «занимаются» самопроизвольными превращениями); поэтому должны быть стабильными атомы и атомные ядра.

Казалось бы, описанную картину устройства материи можно было считать вполне безупречной. Однако были «мелочи», никак не укладывавшиеся в рамки картины, например *радиоактивность*, о которой мы упоминали в 5.4.3. Совершенно неожиданно ядра некоторых атомов вдруг «взрывались», превращаясь в ядра других атомов. Довольно скоро стало ясно, что подобные «мелочи» весьма принципиальны.

Конечно, электромагнитная картина представляла собой значительный шаг вперед в познании человеком окружающего мира (по сравнению с механической картиной). Многие детали электромагнитной картины сохранились в современной естественнонаучной картине: понятие физического поля, электромагнитная природа сил, отвечающих за различные явления в веществе (но не в самих атомных ядрах!), ядерная модель атома (атом в виде крошечного массивного ядра и электронной оболочки), дуализм корпускулярных и волновых свойств и многое другое.

В то же время в электромагнитной картине, как и в механической, господствовали *однозначные причинно-следственные связи*, по-прежнему все было жестко детерминировано. Открытые Максвеллом и Больцманом вероятностные физические закономерности *не признавались фундаментальными* и по этой причине не включались в электромагнитную картину мира. Эти вероятности связывали с большими коллективами молекул, а сами молекулы (каждая в отдельности) все равно рассматривались как объекты, подчиняющиеся ньютоновским законам. Столь же однозначными, жестко детерминированными считались и максвелловские законы, управляющие электромагнитным полем. Признавалось, что необратимости имеют вероятностную природу, но из этого не делалось вывода о фундаментальности, первичности вероятностных закономерностей, описывающих природные явления. Одним словом, *лапласовский детерминизм продолжал оставаться краеугольным камнем в системе миропонимания*.

Как и для механической картины мира, для электромагнитной картины был характерен *метафизический подход* к рассмотрению явлений, — когда все четко разграничено, все понятия определены категорично и не предполагают развития и взаимопроникновений; какие-либо внутренние противоречия отсутствуют. Можно сказать, что в девятнадцатом веке научная мысль вплотную приблизилась к осознанию диалектики природы, *оставаясь, однако, на позициях метафизического*

материализма. Видно, многолетний раскол между естествознанием и философией не прошел даром. Переход к *диалектическому материализму* только предстоял.

В заключение приведем отрывок из книги *А. Эйнштейна* и *Л. Инфельда* «Эволюция физики», вышедшей в свет в 1938 году, позволив себе выделить курсивом отдельные фразы, представляющиеся нам особенно важными:

*«Мы имеем две реальности: вещество и поле. Несомненно, что в настоящее время мы не можем представить себе всю физику построенной на понятии вещества, как это делали физики в начале девятнадцатого столетия. В настоящее время мы принимаем оба понятия. Можем ли мы считать вещество и поле двумя различными, несходными реальностями? Пусть дана маленькая частица вещества; мы могли бы наивно представить себе, что имеется определенная поверхность частицы, за пределами которой ее уже нет, а появляется ее поле тяготения. В нашей картине область, в которой справедливы законы поля, резко отделена от области, в которой находится вещество частицы. Но что же является физическим критерием, различающим вещество и поле? Раньше, когда мы не знали теории относительности, мы пытались бы ответить на этот вопрос следующим образом: *вещество имеет массу, в то время как поле ее не имеет. Поле представляет энергию, вещество представляет массу*. Но мы уже знаем, что такой ответ в свете новых знаний недостаточен. Из теории относительности мы знаем, что *вещество представляет собой огромные запасы энергии и что энергия представляет вещество*. Мы не можем таким путем провести качественное различие между веществом и полем, так как различие между массой и энергией не качественное. Гораздо большая часть энергии сосредоточена в веществе, но поле, окружающее частицу, также представляет собой энергию, хотя и в несравненно меньшем количестве. Поэтому мы могли бы сказать: *вещество — там, где концентрация энергии велика, поле — там, где концентрация энергии мала*. Но если это так, то различие между веществом и полем скорее *количественное*, чем *качественное*. Нет смысла рассматривать вещество и поле как два качества, совершенно отличные друг от друга. Мы не можем представить себе резкую границу, разделяющую поле и вещество. Те же трудности вырастают для заряда и его поля. Кажется невозможным дать ясный качественный критерий, позволяющий провести различие между веществом и полем, между зарядом и полем...*

Мы не можем построить физику на основе только одного понятия — вещества. Но деление на вещество и поле, после признания эквивалентности массы и энергии, есть нечто искусственное и неясно определенное».

Тут же авторы книги отмечают, что многое остается неясным. В частности, встает вопрос о том, *как частицы взаимодействуют с полем*. Ответы на многие вопросы, связанные с полем и веществом, привели, как отмечают авторы книги, «к новым идеям в физике, идеям *квантовой теории*».

Пройдет время — и граница между веществом и полем станет «прозрачной»; *обе формы материи окажутся взаимопревращаемыми*. Но понимание этого будет достигнуто не с метафизических позиций электромагнитной картины, а с диалектических позиций современной естественнонаучной картины мира.

5.6 БЕСЕДА О ПРИВЫЧКЕ ВИДЕТЬ ЗА ВЕРОЯТНОСТЯМИ ОДНОЗНАЧНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ, А ТАКЖЕ О НЕЖЕЛАНИИ РАЗГЛЯДЕТЬ ВЕРОЯТНОСТЬ В НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССАХ

Они хранили в жизни мирной
Привычки милой старины...

А. Пушкин

Читатель. Признаться, мне импонирует идеология электромагнитной картины мира. Имеется электромагнитное поле и поле тяготения. В полях движутся частицы, обладающие какими-то массами и, возможно, электрическими зарядами. Частицы движутся по законам механики Ньютона. Заряды взаимодействуют по законам Максвелла с электромагнитным полем, характеризующимся в каждой точке определенными векторами **Е** и **В**. Если в начальный момент времени заданы координаты и скорости *всех частиц*, то в принципе возможно (я подчеркиваю: в принципе, а не технически) точно определить координаты и скорости частиц в любой последующий момент времени.

Автор. Вас не смущает, что при этом Вы уподобляетесь тому самому всезнающему существу (или Уму), о котором писал Лаплас?

Читатель. Мне нечего смущаться. Просто я рассматриваю конкретную, четко поставленную задачу из области механики и электродинамики. Правда, с чрезвычайно большим количеством тел.

Автор. Оставим в покое электродинамику и ограничимся механикой. В кубическом сантиметре газа при нормальных условиях находится около 10^{19} молекул. Вам пришлось бы иметь дело с фантастически сложной задачей.

Читатель. Не спорю, трудности исключительно огромны. Однако они имеют не *принципиальный*, а чисто *технический* характер. И поскольку наши вычислительные возможности не беспредельны, придется прибегнуть к вероятностям — вероятности молекуле газа попасть в такой-то объем, вероятности иметь скорость в таком-то интервале значений и т. д.

Автор. Вот и Вы полагаете, что использование вероятностей связано лишь с практической невыполнимостью чересчур громоздких расчетов и что за *этим* вероятностями скрываются однозначные закономерности, управляющие поведением отдельных молекул!

Читатель. Да, я так полагаю.

Автор. У меня есть, по крайней мере, пять серьезных аргументов в пользу того, что вероятностное рассмотрение коллективов молекул необходимо по принципиальным, а не только по «техническим» соображениям, что в *самой природе* этих коллективов существует объективная случайность, которую *нельзя свести к неполноте наших знаний* и неумению выполнять столь громоздкие расчеты.

Читатель. Готов узнать эти аргументы.

Автор. Вот *первый*. Допустим, существует жесткая система однозначных взаимосвязей в коллективе молекул газа. Представим себе, что вдруг какое-то число молекул исчезнет (они попросту вылетели из сосуда). Значит, вместе с этими молекулами исчезнут и все предопределенные их присутствием в газе последующие столкновения с другими молекулами, что, в свою очередь, изменит поведение этих других молекул. Все это должно сказаться на *всей совокупности жестких взаимосвязей* и, как следствие, на поведении коллектива молекул в целом. Однако известно, что можно совершенно безболезненно с точки зрения газа, рассматриваемого как целое, изъять сразу весьма большое число молекул (например, 10^{12} молекул и даже существенно больше). При этом некоторые параметры газа, его поведение не изменятся. Разве это не указывает на то, что динамические закономерности, управляющие поведением отдельных молекул, строго говоря, *не определяют поведение газа в целом*? Разве не *обесценивается заранее* наше желание проследить за изменением со временем координат и скоростей отдельных молекул?

Читатель. Мне кажется, что тут все зависит от того, *насколько точно* мы хотели бы определить параметры и поведение рассматриваемого газа. Если ставится задача определить их *совершенно точно*, то, возможно, придется учитывать судьбу даже *одной* молекулы.

Автор. Однако неясно, какой смысл может иметь фраза «совершенно точно определить параметры и поведение газа». Каковы критерии для оценки *степени* этой «точности»? Как ее можно оценивать в принципе, если неизвестно, что именно она собой представляет?

Читатель. Если известно, как изменяются со временем координаты и скорости каждой частицы нашего газа, то можно, в принципе, представить, например, *картину флуктуаций плотности* газа во всех точках занимаемого им объема для разных моментов времени. Степень

точности поведения газа можно рассматривать как степень точности представления во времени упомянутой картины флуктуации.

Автор. Как я понимаю, Вы говорите о точном предсказании картины флуктуации плотности газа. В таком случае предлагаю свой *второй аргумент*. Начну с простого примера. Камень бросают из некоторой точки под некоторым углом к горизонту с некоторой начальной скоростью. В какой-то момент полета мы мысленно изменяем направление скорости камня (той скорости, какую он будет иметь в этот момент) на противоположное. Ясно, что камень *возвратится* в точку бросания и будет иметь в ней ту же скорость (по модулю), какая у него была в момент бросания. Получается, что летящий камень как бы «помнит» все время свою «историю».

Читатель. Это естественно — ведь каждое мгновенное состояние летящего камня предопределено предыдущим и, в свою очередь, определяет последующее.

Автор. Любую траекторию можно, в принципе, *обратить* и тем самым как бы возвратиться в прошлое. В этом и проявляются жесткие (динамические) закономерности. Не так ли?

Читатель. Да, именно так.

Автор. А теперь представьте себе другую ситуацию. Имеется пучок молекул, скорости которых взаимно параллельны. Этот пучок направлен через некоторое отверстие в сосуд. Попадая в сосуд, молекулы испытывают великое множество столкновений (не только между собой, но и со стенками сосуда), и в результате газ, образуемый рассматриваемыми молекулами, придет через некоторое время в состояние *термодинамического равновесия*. В этом состоянии утрачена какая-либо «память» о прошлом. Можно сказать, что пришедший в тепловое равновесие газ как бы «забыл» свою *предысторию*, не «помнит», каким именно образом он пришел в равновесное состояние. Поэтому нет смысла говорить о том, чтобы обратить ситуацию, — молекулы все равно не соберутся в единый пучок, выходящий из сосуда в определенном направлении. Можно привести немало примеров подобной «забывчивости». Предположим, что по одну сторону перегородки в сосуде находится один газ, а по другую сторону другой. Если убрать перегородку, произойдет перемешивание молекул обоих газов. Вполне понятно, что не надо пытаться обратить картину — молекулы не распределятся по «своим» половинам сосуда. Газ, в котором произошло перемешивание, уже «забыл» свою предысторию.

Читатель. В этом я с Вами согласен.

Автор. Поставим вопрос: когда происходит «утрата предыстории»? Ответ: это происходит тогда, когда на сцене появляется *случайность*. Вот Вы подбрасываете игральный кубик. Допустим, выпала тройка. Вы снова подбрасываете — выпала пятерка. Выпадение пятерки никак не связано с тем, что перед этим выпала тройка. Вы бросаете кубик много раз и получаете некий набор выпавших цифр (очков на гранях). В нем обнаруживается закономерность: пятерка (как, впрочем, и любая из шести цифр) встречается примерно в одной шестой всех случаев. Данная закономерность не связана с выпадением тех или иных цифр при бросаниях кубика, и в этом смысле она *не имеет предыстории*. Вы можете произвести новую серию бросаний — получится иной набор выпавших цифр; однако упомянутая закономерность снова будет наблюдаться. *Утрата предыстории* говорит о том, что здесь (и в случае с кубиком, и в случае с газом) мы имеем дело, в отличие от механики, с закономерностями иного типа — *статистическими*, или, иначе говоря, *вероятностными*. Здесь случайность играет *принципиальную роль*, и именно поэтому не следует пытаться свести эти закономерности к динамическим.

Читатель. Ваше замечание об утрате предыстории при перемешивании двух газов напомнило мне наши прошлые разговоры по поводу *стохастичности необратимых процессов*.

Автор. Вы сами догадались о моем третьем аргументе. Действительно, как мы уже обсуждали (напомню § 10.6 в книге «Вероятность в современном обществе», а также § 5.1 в данной книге), *в основе необратимых процессов в веществе всегда лежит стохастичность*. А поскольку все процессы в природе являются, строго говоря, необратимыми, то следовательно, фундаментальны (первичны) именно статистические, а не динамические закономерности. Принцип возрастания энтропии демонстрируют не только явления перемешивания газов или передачи теплоты от горячего тела к холодному, но вообще все явления, где есть теплопроводность или трение. *Исторически укоренившаяся в нашем сознании привычка видеть за вероятностями однозначные закономерности логично сочетается с нежеланием разглядеть вероятность в необратимых процессах*. Мы привыкли либо не говорить о вероятности всерьез (полагая, что в основе всего должен быть жесткий детерминизм), либо попросту не замечать вероятность.

Читатель. Казалось бы, все было так ясно. Сначала мы изучаем механику Ньютона, объясняющую движение обычных тел. Здесь все очень наглядно и может быть доказано прямыми экспериментами. Затем, применяя механику к движениям молекул в газе, мы рассматриваем термодинамику и можем выразить с помощью языка механики

температуру и давление газа. И температура, и давление имеют *механические аналоги* — среднюю энергию и усредненное изменение импульса, соответственно.

Автор. Именно так рассуждали создатели молекулярно-кинетической теории газов, будучи, по сути дела, приверженцами жесткого (лапласовского) детерминизма. Они отталкивались именно от механики. *Жесткий детерминизм всегда прекрасно согласовывался с идеологией механицизма.* Привычка видеть за вероятностями однозначные закономерности — это, по большому счету, привычка все явления сводить к механическим процессам или выражать через эти процессы. Механицизм для нас психологически комфортен, ибо он предлагает наглядные образы, но, по сути своей, метафизичен. Недаром же первую в истории физическую науку, предоставившую серьезное обоснование фундаментальности вероятностных закономерностей, называли «статистической механикой». Пусть «статистической», но все-таки «механикой», хотя сфера механики — динамические законы Ньютона. Но сегодня уже ясно, что идеология механицизма страдает ограниченностью. Можно сказать, что идеология жесткого детерминизма также страдает ею. *Динамические закономерности отражают реальность в той же мере приближенно, в какой ее отражает механическая картина мира.* И это есть мой *четвертый аргумент.*

Читатель. Над этим стоит подумать.

Автор. Между прочим, отнюдь не все термодинамические величины имеют аналоги в механике. У *энтропии*, например, нет механического аналога.

Читатель. И все же давайте на время забудем о необратимости и о несовершенстве механической картины мира. Я хочу обратиться к конкретно поставленной задаче. Имеются N молекул (число N может быть каким угодно). В момент t_0 молекулы имеют положения, задаваемые проведенными из начала координат радиус-векторами $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \dots, \mathbf{r}_N$. Скорости молекул в момент t_0 тоже заданы: $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \dots, \mathbf{v}_N$. Известно, что молекулы образуют газ и взаимодействуют, сталкиваясь друг с другом, в соответствии с законами Ньютона; кроме того, они испытывают упругие соударения со стенками сосуда, внутри которого находится газ. Разве нельзя, в принципе, поставить вопрос о том, каковы будут радиус-векторы и скорости каждой из N молекул в некоторый момент t_1 ?

Автор. Что ж, придется предъявить *пятый аргумент.* Почему Вы полагаете, что молекулы характеризуются в тот или иной момент времени определенной скоростью и определенной координатой? Почему Вы полагаете, что молекулы упруго соударяются со стенками сосуда?

Читатель. Но разве это не так?

Автор. Вы не приняли во внимание, что *молекула — это вовсе не шарик, движущийся по законам ньютоновской механики, а качественно иной объект* (так называемый *микрообъект*), который нельзя рассматривать по аналогии с бильярдным шаром. К микрообъектам относятся *молекулы, атомы, ионы, элементарные частицы* (например, *электроны и протоны*). Они ведут себя по законам не ньютоновской механики, а так называемой *квантовой механики* (ей будут посвящены темы 8 и 9 данной книги).

Читатель. Существенно ли отличаются законы квантовой механики от законов классической механики Ньютона?

Автор. Вообще говоря, существенно. Так, согласно законам квантовой механики микрообъект не может характеризоваться одновременно и определенным положением в пространстве, и определенной скоростью; следовательно, траектория микрообъекта либо вообще отсутствует, либо имеет приблизительный характер. Мы уже отмечали (см. § 5.4), что движение электронов внутри электронной оболочки атома нельзя представлять в виде траекторий. Весьма существенно (это подчеркнем особенно!), что не только коллектив микрообъектов, но и *каждый отдельный микрообъект описывается вероятностными закономерностями*.

Читатель. Но каким образом проявляется в поведении отдельного микрообъекта вероятность?

Автор. Позднее мы поговорим об этом подробно, а пока я просто приведу примеры. Ученые обнаружили, что, находясь вне атомного ядра, *нейтрон* (электрически нейтральная элементарная частица с массой в 1838,5 раз больше массы электрона) обнаруживает нестабильность: он *самопроизвольно превращается в три частицы: электрон, протон и электронное антинейтрино*. Это превращение (его называют «распадом нейтрона») имеет *вероятностный характер*. Невозможно предсказать, когда именно произойдет распад любого конкретного нейтрона. Можно говорить лишь о вероятности нейтрону «прожить» до распада какое-то время t ; она равна $e^{-t/\tau}$ (где $\tau \approx 900$ с). Любопытно, что эта вероятность *не зависит* от того, сколько уже «прожил» данный нейтрон к моменту начала отсчета времени.

Читатель. Получается, что нейтроны «не стареют»?

Автор. Вот именно. Другой пример — *явление радиоактивности* (превращения нестабильных атомных ядер в другие ядра). Например, атомное ядро нептуния, содержащее 93 протона и 144 нейтрона, может самопроизвольно превратиться в α -частицу и ядро протактиния. Как и в случае нейтрона, вероятность ядру нептуния «прожить» до превращения

время t равна $e^{-t/\tau}$, только теперь $\tau = 2,2 \cdot 10^6$ лет (величину τ условно называют «временем жизни» соответствующего нестабильного ядра). В свою очередь, ядро протактиния может самопроизвольно превратиться в электрон и ядро урана (теперь $\tau = 27$ суток). Ядро урана может превратиться в α -частицу и ядро тория (теперь $\tau = 1,6 \cdot 10^5$ лет). Ядро тория может превратиться в α -частицу и ядро радия (теперь $\tau = 7340$ лет). На этом цепочка превращений не заканчивается, но мы ее продолжать не станем.

Макс Планк в своей речи на торжественном заседании Берлинского университета в 1914 году весьма выразительно описал акт радиоактивного превращения:

«Почему какой-нибудь атом, пролежав миллионы лет совершенно неизменным и пассивным среди своих соседей, внезапно позорит свое имя «неизменного атома» и взрывается без всякого видимого повода? Взрыв происходит с такой силой, по сравнению с которой наши сильнейшие взрывчатые вещества не больше, как детские пистоны. Обломки вылетают со скоростями в тысячи километров в секунду, в то же время возникает электромагнитное излучение, которое по способности пронизывать материю превосходит самые жесткие рентгеновские лучи. А между тем рядом лежащий атом, который, по-видимому, ничем не отличается от данного, может пролежать еще миллионы лет в полной пассивности, пока, наконец, не пробьет его час. *Всякая попытка высказать хотя бы какое-нибудь предположение о динамических законах радиоактивного распада представляется в настоящее время совершенно безнадежной*, особенно если вспомнить, как безуспешны оказались все старания *повлиять* на радиоактивные явления путем внешних воздействий, например повышением или понижением температуры».

Читатель. Ну, если вероятностные закономерности описывают поведение даже отдельного микрообъекта, тогда действительно придется согласиться с тем, что они фундаментальны. Однако, не слишком ли много случайностей? Совершенно случайно, без воздействия извне нейтрон вдруг превращается в три частицы. Атомное ядро, пребывающее в покое многие годы, вдруг ни с того, ни с сего взрывается. Не означает ли это, что в явлениях микромира *фактически отсутствует причинность*?

Автор. Распад нейтрона, как и любое событие в мире, не является событием беспричинным. Реальность вообще не имеет дела с понятием беспричинного события. Строго говоря, термин «самопроизвольный распад» неточен. В принципе, самопроизвольность можно было бы отнести лишь к *полностью изолированному* объекту. Но любой микрообъект — вовсе не изолированный объект, *он взаимодействует со всем миром*. Причем термин «взаимодействие» следует понимать здесь шире,

чем это понимается при рассмотрении силовых взаимодействий. Это есть один из принципиальных вопросов, рассматриваемых в квантовой механике.

Читатель. Нельзя ли как-то пояснить это?

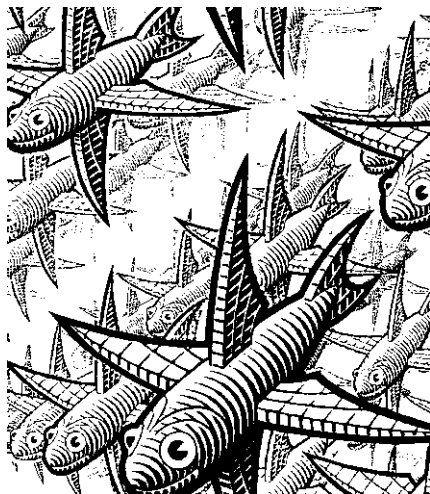
Автор. На определенном уровне исследования физических явлений объекты *принципиально утрачивают свою изолированность*, исчезают разграничения, стираются грани. Так, стираются грани между полем и веществом. Недаром в мире элементарных частиц главное явление — взаимопревращения частиц.

Читатель. И все-таки, как представить себе «неизолированность» нейтрона, который распадается в вакууме в полнейшем удалении от каких-либо тел или полей?

Автор. А как Вы понимаете вакуум?

Читатель. Как пустоту, где ничего нет. Если, конечно, иметь в виду полный вакуум, а не просто хорошо откачанный объем.

Автор. По современным представлениям, вакуум — это не пустота. Вакуум в буквальном смысле «заполнен» *случайным образом рождающимися и уничтожающимися* элементарными частицами различных типов (фотонами, электронами, мезонами и др.). Для всех них используют специальный термин — *виртуальные частицы*. В принципе нельзя проследить за взаимодействием нашего нейтрона с виртуальными частицами вакуума, но оно, конечно, есть. Так что нельзя говорить об изолированности нейтрона в вакууме. Подчеркнем: *современный вакуум — вовсе не пустота*. Современная наука наполнила новым смыслом древнее изречение «Природа не терпит пустоты».



ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Был этот мир глубокой тьмой окутан.
Да будет свет! И вот явился Ньютон.
Но сатана недолго ждал реванша.
Пришел Эйнштейн — и стало все, как раньше.

Роберт Бернс
(Перевод С.Я. Маршака)

Влияние теории относительности выходит далеко за пределы тех проблем, из которых она возникла. Она снимает трудности и противоречия теории поля; она формулирует более общие механические законы; она заменяет два закона сохранения одним; она изменяет наше классическое понятие абсолютного времени. Ее ценность не ограничивается лишь сферой физики; она образует общий остов, охватывающий все явления природы.

Альберт Эйнштейн

6.1 ПРОБЛЕМА МИРОВОГО ЭФИРА

В XIX веке оптика развивалась как учение о световых волнах, которые, как предполагалось, распространяются в специфической невесо-

мой среде, заполняющей все мировое пространство, проникающей во все тела; эту среду называли *мировым эфиром*. «Гипотеза о существовании эфира составляла для физика прошлого столетия важную часть представления о Вселенной, — писал в 1910 году *Альберт Эйнштейн*. — Возникновение электромагнитной теории света внесло некоторые изменения в гипотезу об эфире. Прежде всего, не вызывало сомнений, что электромагнитные явления необходимо свести к способам движения этой среды. Однако постепенно крепло убеждение в том, что никакая механическая теория эфира не дает ясного представления об электромагнитных явлениях, и тогда стали рассматривать электрические и магнитные поля как сущности, механическое толкование которых является излишним. Прямым следствием такого толкования было то, что эти поля в пустоте стали рассматривать как особые состояния эфира, не требующие более детального анализа».

Если принять существование эфира, то необходимо ответить на вопрос о характере воздействия на этот эфир со стороны движущихся тел. Здесь есть две крайние альтернативы. Первая: *всякое тело при своем движении полностью увлекает за собой эфир*. Вторая: *при движении тела эфир остается неподвижным*; в этом случае наблюдатель, находящийся на движущемся теле, должен, в принципе, обнаружить «эфирный ветер».

Сначала была отвергнута первая альтернатива. Результаты выполненного в 1851 году опыта французского физика *Армана Иннолита Физо* (1819–1896) (в опыте исследовалась интерференция двух световых лучей, один из которых распространялся внутри потока воды в направлении, совпадающем с направлением движения воды, а другой — в противоположном направлении) свидетельствовали против гипотезы о полном увлечении эфира движущимися телами. Об этом же свидетельствовали наблюдения аберрации света, приходящего к нам от звезд.

Эксперимент по проверке второй альтернативы, т. е. по обнаружению «эфирного ветра» был выполнен в 1887 году американским физиком *Альбертом Майкельсоном* (1852–1931). В опыте сравнивалась скорость света в направлении движения Земли и в перпендикулярном направлении. Использовался специальный прибор — *интерферометр Майкельсона* — с системой отражающих зеркал, установленной на квадратной каменной плите со сторонами по 1,5 м и толщиной 30 см, которая плавала в чаше с ртутью (чтобы ее можно было без сотрясения поворачивать вокруг вертикальной оси). Точность эксперимента была исключительно высока; она позволяла обнаружить изменение скорости распространения света (при повороте плиты на 90°) даже на 2 м/с. Тем не менее «эфирный ветер» не наблюдался — движения Земли по отношению

к эфиру зафиксировать не удалось. Отрицательный результат эксперимента Майкельсона нанес сокрушительный удар также и по второй альтернативе — гипотезе неподвижного эфира.

Стремясь спасти положение, *Хендрик Антон Лоренц* выдвинул в 1892 году предположение, что «эфирный ветер» обуславливает сокращение размеров тел в направлении их движения в $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ раз (здесь v и c — соответственно скорости тела и света относительно неподвижного эфира). Аналогичную мысль высказывал еще в 1889 году известный ирландский физик *Джордж Фитцджеральд* (1851–1901). «Чтобы привести отрицательный результат эксперимента Майкельсона в согласие с теорией неподвижного эфира, — писал впоследствии Эйнштейн, — Лоренц и Фитцджеральд выдвинули гипотезу о том, что плита интерферометра со всеми смонтированными на ней приборами испытывает в направлении движения Земли небольшое сокращение в размерах, как раз такое, что ожидаемый эффект компенсируется противоположным эффектом».

Полагая, что гипотеза о сокращении размеров тел в направлении их движения объясняет отрицательный результат опыта Майкельсона, Лоренц продолжал рассматривать распространение световых волн в неподвижном эфире и разработал в 1895 году весьма стройную теорию — *электродинамику движущихся сред*. При всех своих достоинствах эта теория имела, однако, существенный изъян — она предполагала отказ от принципа относительности, вводя *неравноправие разных инерциальных систем отсчета*. С неподвижным эфиром связывалась особая система отсчета, которую можно было считать *абсолютно неподвижной*, все остальные инерциальные системы оказывались принципиально отличными от нее и различались по степени отличия от абсолютно неподвижной системы. Как подчеркивал Эйнштейн, «если в механике не существует абсолютного движения, а только движение одних тел относительно других, то в теории Лоренца существует особое состояние, которое физически соответствует состоянию абсолютного покоя; это состояние тела, которое неподвижно относительно эфира».

Возникал вопрос: нельзя ли все-таки согласовать основные положения теории Лоренца с принципом относительности? В 1904–1905 годах этот вопрос приобрел особую остроту. В этой связи отметим три события. Первое: выход в свет в 1904 году основополагающей работы Лоренца «Электромагнитные явления в системах, движущихся с произвольной скоростью, меньшей скорости света». В этой работе были сформулированы знаменитые преобразования координат и времени для перехода из

одной инерциальной системы отсчета в другую (Пуанкаре предложил назвать их *преобразованиями Лоренца*; так они и вошли в науку). Второе событие: выход в свет в том же году статьи известного французского математика, физика, философа *Жюль Анри Пуанкаре* (1854–1912), где был четко сформулирован принцип относительности: *«Законы физических явлений будут одинаковыми как для покоящегося наблюдателя, так и для наблюдателя, находящегося в состоянии равномерного прямолинейного движения, так что мы не имеем никаких средств, чтобы различать, находимся ли мы в таком движении или нет»*. И, наконец, третье событие, наиболее важное: появление в 1905 году фундаментальной работы Альберта Эйнштейна *«К электродинамике движущихся тел»*. Именно с этой работой принято связывать рождение *специальной теории относительности*. Здесь был сделан решающий шаг: положения теории Лоренца были приведены в соответствие с принципом относительности благодаря новому подходу к фундаментальным вопросам пространства и времени. Существенно, что при этом пришлось *вообще отказаться от эфира*; тем самым проблема мирового эфира была окончательно решена.

Говоря о теории относительности, Эйнштейн подчеркивал: *«...Представление об эфире как носителе электрических и магнитных сил не находит места в излагаемой здесь теории. Напротив, электромагнитные поля оказываются здесь не состояниями некоторой материи, а самостоятельно существующими объектами, имеющими одинаковую природу с весомой материей и обладающими вместе с ней свойством инерции»* (1907).

Позднее, уже в 1938 году, Эйнштейн писал:

«Оглядываясь на развитие физики, мы видим, что вскоре после своего рождения эфир стал «выродком» в семье физических субстанций. Во-первых, построение простой механической модели эфира оказалось невозможным и было отброшено. Этим в значительной степени был вызван крах механистической точки зрения. Во-вторых, мы должны были потерять надежду на то, что благодаря существованию эфирного моря будет выделена одна система координат, что позволило бы нам опознать не только относительное, но и абсолютное движение... Все наши попытки сделать эфир реальным провалились. Он не обнаружил ни своего механического строения, ни абсолютного движения. От всех свойств эфира не осталось ничего, кроме того свойства, из-за которого его и придумали, а именно, кроме способности передавать электромагнитные волны. Все попытки открыть свойства эфира привели к трудностям и противоречиям. После стольких неудач наступил момент, когда следует совершенно забыть об эфире и постараться никогда больше не упоминать о нем».

6.2. ДВА ПОСТУЛАТА СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА; НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

В основу специальной теории относительности Эйнштейн положил два постулата. Первый постулат, называемый *принципом относительности*, можно сформулировать так: *все законы природы одинаковы в любой инерциальной системе отсчета*. Второй постулат, называемый *принципом постоянства скорости света*, можно сформулировать так: *скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета*. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала. Заметим, что фактически принцип постоянства скорости света является следствием принципа относительности.

«В теории Лоренца, — отмечал Эйнштейн, — принцип постоянства скорости света справедлив только для одной системы — системы, находящейся в покое относительно эфира. Если мы хотим сохранить принцип относительности, мы обязаны допустить справедливость принципа постоянства скорости света для любой системы, движущейся без ускорения».

В классической механике переход от одной инерциальной системы координат к другой описывался *преобразованиями Галилея*:

$$\boxed{x' = x - vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t.} \quad (1)$$

Здесь предполагается, что штрихованная система движется со скоростью v относительно нештрихованной — см. рисунок 1 в таблице 8. Скромное равенство $t' = t$ означает, что во всех системах время течет *одинаково*, что слова «сейчас», «настоящий момент» имеют абсолютный смысл. До начала XX столетия этот факт представлялся очевидным. (Многие люди и поныне считают этот факт очевидным).

В специальной теории относительности вместо преобразований Галилея применяются *преобразования Лоренца*:

$$\boxed{x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - (vx/c^2)}{\sqrt{1 - \beta^2}}.} \quad (2)$$

Здесь и далее будем полагать, что $\beta = v/c$, где c — скорость света.

Легко видеть, что при $v \ll c$ преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея (тем точнее, чем меньше скорость v).

Ниже мы покажем, как Эйнштейн вывел преобразования (2), исходя из двух постулатов специальной теории относительности. Заметим, что Лоренц шел к этим преобразованиям более сложным путем, используя при этом произвольные допущения.

С учетом преобразований Лоренца следует говорить не о *системе координат*, а о *системе отсчета*, т. е. принимать во внимание совокупность взаимосвязанных координат и времени. Абсолютности времени теперь не существует. Каждая система отсчета характеризуется своим собственным временем. *Указывая момент времени, надо указывать соответствующую систему отсчета.*

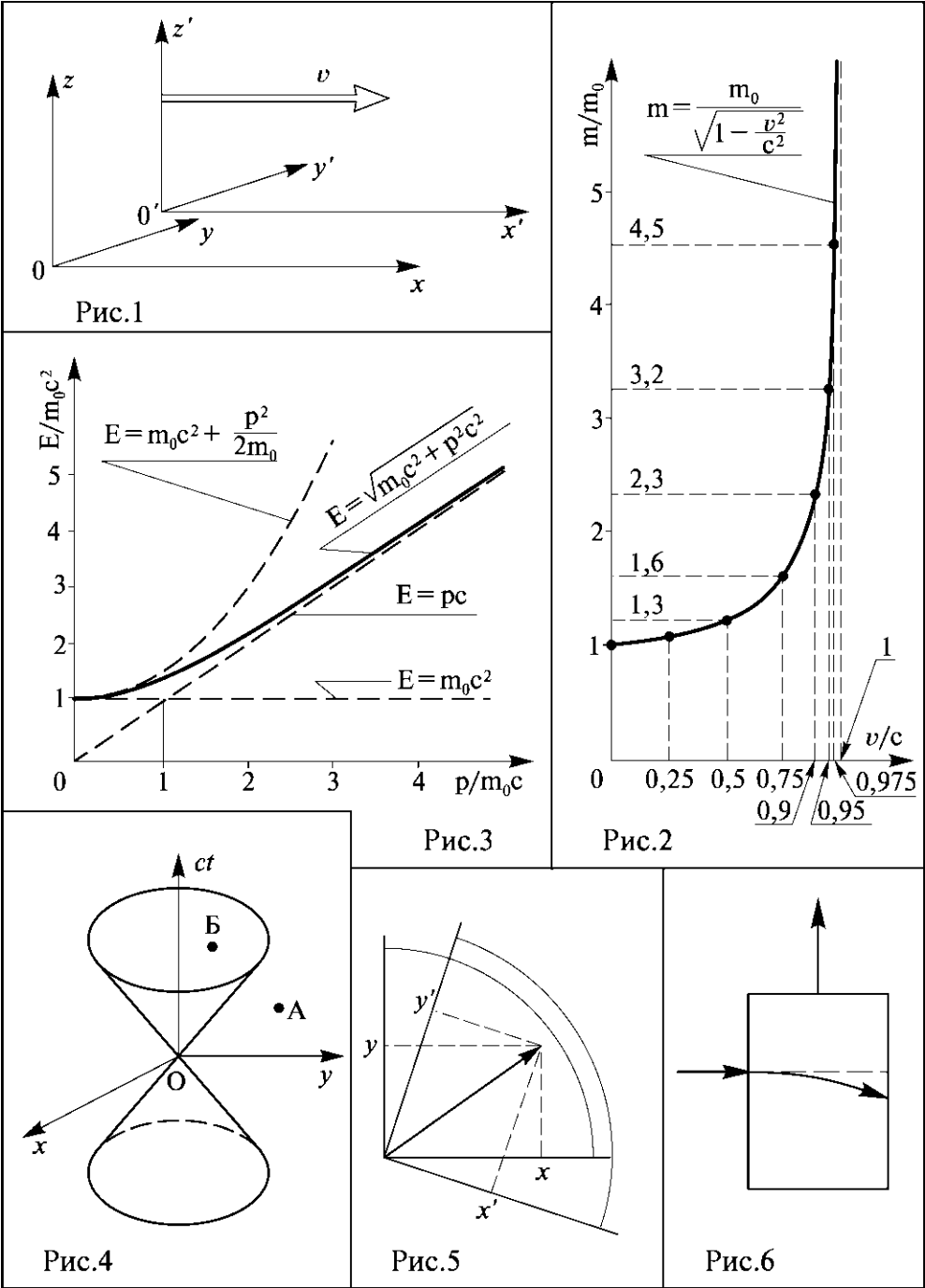
Отметим, что при создании специальной теории относительности Эйнштейн не просто воспользовался готовыми преобразованиями Лоренца; он дал им *принципиально новый физический смысл*. Лоренц исходил из гипотезы неподвижного эфира и связывал с эфиром абсолютно покоящуюся систему отсчета. Он полагал, что только в этой системе длина тела и ход времени являются «истинными». При переходе к другим системам (системам, движущимся относительно покоящейся системы с той или иной скоростью) происходит, как он полагал, *буквальное* сокращение размеров тела — *как результат воздействия, оказываемого «эфирным ветром» на электронную структуру тела*. Чем больше скорость тела относительно мирового эфира, тем сильнее «эфирный ветер» и, как следствие, тем значительнее сокращение размера тела в направлении движения.

Теперь обратимся к Эйнштейну. У него эфира нет вообще, а значит, нет привилегированной (абсолютно покоящейся) системы отсчета; *все инерциальные системы физически равноправны*. Соответственно нет и буквального (абсолютного) сокращения продольного размера тела. Наблюдатель из нештрихованной системы (напомним рисунок 1) фиксирует укорочение тела, покоящегося в штрихованной системе. В свою очередь, наблюдатель из штрихованной системы зафиксирует укорочение тела, находящегося в нештрихованной системе.

Представим себе такую ситуацию: две шарообразные капсулы (в одной сидит наблюдатель *А*, а в другой — наблюдатель *Б*) с большой скоростью движутся друг относительно друга. Наблюдателю *А* другая капсула будет представляться не сферой, а сплюснутым эллипсоидом вращения; у собственной же капсулы он никаких отклонений от сферической формы не обнаружит. Точно так же наблюдателю *Б* собственная капсула будет представляться сферой, а другая капсула — эллипсоидом.

Пространство и время взаимосвязаны. Не только продольные размеры тела, но и ход времени зависят от выбора системы отсчета, из которой ведется наблюдение. С точки зрения наблюдателя *А* (в приведенном выше

Таблица 8. Теория относительности



примере) часы наблюдателя B будут отставать. Наблюдатель же B будет утверждать, что, напротив, его часы идут правильно, а вот часы наблюдателя A отстают.

Процитируем отрывок из книги *М. Гарднера* «Теория относительности для миллионов» (перевод с английского, М.: «Атомиздат», 1965): «Подобно Лоренцу Эйнштейн понял, что измерения длины и времени должны зависеть от относительного движения объекта и наблюдателя. Однако Лоренц прошел только половину пути. Он сохранил понятие абсолютной длины и абсолютного времени для покоящихся относительно эфира тел; он считал, что эфирный ветер искажает «истинную» длину и «истинное» время. Эйнштейн прошел путь до конца. Эфирного ветра нет, сказал он, потому что нет эфира. Нет смысла в понятиях абсолютной длины и абсолютного времени. Это ключ к специальной теории относительности Эйнштейна. Когда он его повернул, всевозможные замки начали открываться».

А вот цитата еще из одной книги (*Б. Гоффман*. «Корни теории относительности»; перевод с английского, М.: «Знание», 1987): «Эйнштейн вывел преобразования Лоренца, исходя из двух фундаментальных принципов и таким образом показал, что именно преобразования Лоренца (а не преобразования Галилея) описывают универсальные взаимосвязи, отражающие характерные особенности пространства и времени как таковых... И хотя Эйнштейн пользовался той же самой математической записью этих преобразований, что и Лоренц и Пуанкаре, применял он их, опираясь на принципиально новые концепции пространства и времени».

Покажем, как, *используя только постулаты специальной теории относительности*, Эйнштейн получил соотношения (2) для преобразований Лоренца. В соответствии со *вторым постулатом* (принципом постоянства скорости света) он исходил из того, что в обеих системах отсчета (штрихованной и нештрихованной) световой сигнал распространяется с одной и той же скоростью — скоростью c . Поэтому можно записать: $x' - ct' = 0$ (для световых лучей, распространяющихся вдоль положительного направления оси x') и $x - ct = 0$ (для лучей, распространяющихся вдоль положительного направления оси x). Отсюда следует, что

$$x' - ct' = \lambda(x - ct) \quad (*)$$

(λ — некоторый постоянный множитель). Аналогично для лучей, распространяющихся вдоль отрицательного направления оси x' (оси x):

$$x' + ct' = \mu(x + ct) \quad (**)$$

(μ — некоторый постоянный множитель). Из (*) и (**) находим:

$$\left. \begin{aligned} x' &= ax - bct, \\ ct' &= act - bx, \end{aligned} \right\} \quad (***)$$

где, как нетрудно сообразить, $a = (\lambda + \mu)/2$; $b = (\lambda - \mu)/2$.

Для начала координат штрихованной системы ($x' = 0$) запишем, исходя из первого уравнения (***): $x = bct/a$. Значит, bc/a есть скорость, с какой штрихованная система движется относительно нештрихованной:

$$bc/a = v \quad (****)$$

(разумеется, с точно такой же по модулю скоростью нештрихованная система движется относительно штрихованной).

В соответствии с *первым постулатом* (принципом относительности) длина некоторого тела, покоящегося в штрихованной системе, измеряемая наблюдателем из нештрихованной системы, должна быть равна длине этого тела, покоящегося в нештрихованной системе, если теперь длину измеряют из штрихованной системы. Выполним первое из указанных двух измерений: сделаем из нештрихованной системы в момент $t = 0$ «моментальный снимок» тела в штрихованной системе. Из первого уравнения (***): $x' = ax$. Пусть *собственная длина* тела (длина в системе, где тело покоится) есть L , и пусть в штрихованной системе (где как раз тело покоится) эта длина равна длине отрезка оси от нуля до точки x' ($L = x'$). Тогда, с точки зрения наблюдателя, находящегося в нештрихованной системе, длина тела будет $L_1 = x = x'/a = L/a$. Теперь выполним второе измерение: сделаем из штрихованной системы в момент $t' = 0$ «моментальный снимок» тела в нештрихованной системе. Из второго уравнения (***): $act = bx$, или $x = act/b$, или, с учетом (****), $t = vx/c^2$. Принимая во внимание также первое уравнение (***), находим $x' = a[1 - (v/c)^2]x$. Полагаем $x = L$ (собственная длина тела); тогда, с точки зрения наблюдателя, находящегося в штрихованной системе, длина тела будет $L_2 = a[1 - (v/c)^2]L$. В соответствии с первым постулатом надо принять: $L_1 = L_2$. Таким образом, $L/a = a[1 - (v/c)^2]L$, или

$$a^2 = 1/[1 - (v/c)^2]. \quad (*****)$$

С учетом (****) и (*****), перепишем (***) в виде:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; \\ t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \end{aligned} \right\}$$

Преобразования Лоренца выведены.

6.3 ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ СОБЫТИЙ, ПРОМЕЖУТКОВ ВРЕМЕНИ И РАССТОЯНИЙ

Рассмотрим некоторые следствия, вытекающие из преобразований Лоренца (2).

А. Относительность одновременности событий.

Пусть два события имеют в нештрихованной системе отсчета пространственно-временные координаты x_1, t_1 и x_2, t_2 , а в штрихованной системе отсчета — координаты x'_1, t'_1 и x'_2, t'_2 соответственно. Согласно (2),

$$t'_2 - t'_1 = [(t_2 - t_1) - v(x_2 - x_1)/c^2] / \sqrt{1 - \beta^2} \quad (3)$$

(напоминаем: $\beta = v/c$). Предположим, что события происходят в нештрихованной системе *одновременно*, но в *разных пространственных точках*: $t_2 = t_1$; $x_2 \neq x_1$. Из (3) видно, что $t'_2 \neq t'_1$. Таким образом, в штрихованной системе указанные события оказываются *неодновременными*.

Б. Относительность промежутков времени.

Пусть в одной и той же точке пространства в штрихованной системе происходят два события, разделенные промежутком времени τ' . Итак, $x'_2 = x'_1$; $t'_2 - t'_1 = \tau'$. Предположим, что эта система связана с космическим кораблем, летящим со скоростью v относительно Земли, и пусть одно из упомянутых событий — космонавт покинул кресло, а другое событие — космонавт вернулся в кресло. Штрихованная система отсчета в данном случае — это система покоя для рассматриваемых событий, они происходят в одной и той же точке (напомним: $x'_2 = x'_1$). Промежуток времени между двумя событиями в системе покоя называют собственным временем (это есть промежуток τ').

Теперь обратимся к нештрихованной системе отсчета, связанной в данном случае с Землей. Обсуждаемые события, если их рассматривать с Земли, будут происходить в разных точках: x_2 и x_1 . По часам земного наблюдателя эти события разделяет промежуток времени $\tau = t_2 - t_1$. Используя (2), нетрудно найти:

$$x = (x' + vt') / \sqrt{1 - \beta^2}; \quad t = \left(t' + \frac{vx'}{c^2} \right) / \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что

$$\tau = \left[(t'_2 - t'_1) + \frac{v}{c^2} (x'_2 - x'_1) \right] / \sqrt{1 - \beta^2} = \tau' / \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (5)$$

Мы видим, что промежуток времени между двумя событиями зависит от системы отсчета. *Он минимален в системе покоя для данных событий (собственное время)*. Рассматриваемый промежуток возрастает в $1/\sqrt{1 - \beta^2}$ раз в системе, движущейся со скоростью v относительно системы покоя. Пусть скорость космического корабля близка к скорости света; допустим, что $v/c = 0,9999$ (корабль будущего?). Тогда $\tau \cong 70 \tau'$. Космонавт покинул кресло всего на 20 минут (по часам корабля), а на

Земле прошли целые сутки между этими событиями (покинул кресло, возвратился в кресло).

Разумеется, данная ситуация обратима. Читатель на Земле прочтет параграф книги за 20 минут, а наблюдателю с космического корабля это чтение представится продолжавшимся целые сутки. Обратимость ситуации исчезает, если стартовавший с Земли космический корабль, в конечном счете, возвратится на Землю. Но это уже сюжет из области не специальной, а общей теории относительности.

В. Относительность длины (сокращение Лоренца—Фитцджеральда).

Пусть тело покоится в штрихованной системе, его собственная длина $x'_2 - x'_1 = L$. Выполним «моментальный снимок» тела из нештрихованной системы в момент $t = 0$. Из (4) следует, что наблюдатель из нештрихованной системы зафиксирует длину L_1 :

$$L_1 = x_2 - x_1 = \frac{(x'_2 - x'_1) + v(t'_2 - t'_1)}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{L - \beta^2 L}{\sqrt{1 - \beta^2}} = L\sqrt{1 - \beta^2}. \quad (6)$$

Очевидно, что длина L_1 всегда в $\sqrt{1 - \beta^2}$ раз короче L .

6.4 ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, МАГНЕТИЗМ И ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Применив преобразования Лоренца к уравнениям Максвелла, Эйнштейн получил выражения, описывающие преобразование электромагнитного поля при переходе из одной инерциальной системы в другую. Имея в виду изображенные на рисунке 1 штрихованную и нештрихованную системы отсчета и используя результаты, полученные в работе Эйнштейна «Принцип относительности и его следствия в современной физике» (1910), представим преобразования для электрической напряженности поля (для составляющих E_x, E_y, E_z вектора $\mathbf{E}$) и магнитной индукции поля (составляющих B_x, B_y, B_z вектора $\mathbf{B}$) в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} E'_x &= E_x; & E'_y &= \frac{E_y - \beta B_z}{\sqrt{1 - \beta^2}}; & E'_z &= \frac{E_z + \beta B_y}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \\ B'_x &= B_x; & B'_y &= \frac{B_y + \beta E_z}{\sqrt{1 - \beta^2}}; & B'_z &= \frac{B_z - \beta E_y}{\sqrt{1 - \beta^2}}; & \left(\beta = \frac{v}{c} \right). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Предположим, что в нештрихованной системе отсчета есть неподвижный электрический заряд и, значит, есть электрическое поле, но нет магнитного поля ($B_x = B_y = B_z = 0$). Из (7) видно, что в штрихован-

ной системе, наряду с электрическим, будет наблюдаться также магнитное поле. Этого следовало ожидать, поскольку покоящийся в нештрихованной системе заряд является движущимся в штрихованной системе. Эйнштейн подчеркивал: «Существование электрического поля, равно как и магнитного, зависит от движения системы отсчета». Он отмечал, что такой вывод нельзя было бы согласовать с представлением о полях как о состояниях мирового эфира.

Небольшое математическое пояснение. Пусть a_x, a_y, a_z — составляющие вектора $\mathbf{a}$, а b_x, b_y, b_z — составляющие вектора $\mathbf{b}$. Скалярное произведение $\mathbf{ab}$ рассматриваемых векторов вычисляется по формуле: $\mathbf{ab} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$. В частности, $a^2 = \mathbf{aa} = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$. Если векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ взаимно ортогональны (перпендикулярны), то $\mathbf{ab} = 0$. Для равных по модулю векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ можно записать: $a^2 = b^2$.

Используя (7), нетрудно получить следующие два равенства (читатель может получить их самостоятельно):

$$\mathbf{E}'\mathbf{B}' = \mathbf{EB}; \quad (8)$$

$$(E')^2 - (B')^2 = E^2 - B^2. \quad (9)$$

Величины $\mathbf{EB}$ и $E^2 - B^2$ называют *инвариантами электромагнитного поля* по отношению к преобразованиям Лоренца (*релятивистскими инвариантами*). Это означает, что они не изменяются при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую.

В частном случае, когда электромагнитное поле представляет собой распространяющуюся в вакууме электромагнитную волну, указанные инварианты равны нулю:

$$\mathbf{EB} = 0; \quad E^2 - B^2 = 0. \quad (10)$$

Первое равенство в (10) выражает поперечность электромагнитной волны, а второе — тот факт, что модули векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$ в электромагнитной волне равны друг другу в каждой точке пространства в каждый момент времени. Напомним, что оба этих свойства электромагнитной волны демонстрировал рисунок 5 в таблице 5. Из (8) и (9) следует, что указанные свойства электромагнитной волны наблюдаются в любой инерциальной системе — в полном соответствии с принципом относительности.

6.5 СВЯЗЬ МЕЖДУ МАССОЙ И ЭНЕРГИЕЙ

В работе «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?» (1905) Эйнштейн приходит к заключению, которое с полным основанием можно было назвать сенсационным: «...Если тело отдает энергию E

в виде излучения, то его масса уменьшается на E/c^2 . Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии». Позднее он формулирует следующий важный вывод специальной теории относительности: «масса и энергия эквивалентны друг другу». Появляется знаменитая формула Эйнштейна, связывающая энергию и массу:

$$\boxed{E = mc^2}. \quad (11)$$

Напомним, что в классической механике используются следующие широко известные выражения для импульса $\mathbf{p}$ и кинетической энергии E тела:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}; \quad (12)$$

$$E = mv^2/2 = p^2/2m. \quad (13)$$

При достаточно больших скоростях (когда уже нельзя пренебрегать скоростью тела v по сравнению со скоростью света c) формулы классической механики (12) и (13) переходят в соответствии с требованиями специальной теории относительности в соответствующие формулы *релятивистской механики*:

$$\mathbf{p} = (m_0/\sqrt{1-\beta^2})\mathbf{v}; \quad (14)$$

$$E = (m_0/\sqrt{1-\beta^2})c^2. \quad (15)$$

Здесь через m_0 обозначена так называемая *масса покоя тела* (масса тела в системе отсчета, связанной с этим телом), а $\mathbf{p}$ и E представляют собой, соответственно, импульс и энергию тела, рассматриваемые в системе, относительно которой тело движется со скоростью v (напомним, что $\beta = v/c$). При введении *релятивистской массы*

$$\boxed{m = m_0/\sqrt{1-\beta^2}} \quad (16)$$

выражение (15) превращается в (11). Из (16) видно, что наблюдатель из данной системы фиксирует массу m_0 тела, если оно покоится в этой системе, и фиксирует массу $m_0/\sqrt{1-\beta^2}$, если тело движется со скоростью v относительно наблюдателя. Зависимость массы тела от скорости представлена графически на рисунке 2 в таблице 8.

Проделаем простые выкладки. Поделив (12) на (13) и возведя обе части полученного равенства в квадрат, находим $p^2/E^2 = v^2c^4$, откуда следует, что

$$v^2 = p^2c^4/E^2. \quad (*)$$

После возведения в квадрат обеих частей равенства (14) получаем:

$$p^2 = m_0^2 v^2 \left/ \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \right. . \quad (**)$$

Подставив (*) в (**), приходим к весьма важному соотношению, связывающему энергию и импульс в релятивистской механике:

$$\boxed{E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}} . \quad (17)$$

Рассмотрим два предельных случая, переписав, для удобства, соотношение (17) в следующем виде (при этом воспользуемся (**)):

$$E = m_0 c^2 \sqrt{1 + p^2 / (m_0 c)^2} = m_0 c^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right)^{1/2} = m_0 c^2 (1 - \beta^2)^{-1/2} . \quad (***)$$

Первый предельный случай соответствует *малым значениям скорости* по сравнению со скоростью света ($v \ll c$). Здесь можно воспользоваться полезным приближенным соотношением:

$$(1 + \xi)^\gamma \approx 1 + \gamma \xi , \quad (18)$$

работающим при $|\xi| \ll 1$ и при любых γ . Положив в (18) $\xi = -\beta^2$, $\gamma = -1/2$, получим из (***):

$$E \approx m_0 c^2 (1 + \beta^2/2) = m_0 c^2 + m_0 v^2/2 , \quad (19a)$$

или, с учетом (14),

$$E \approx m_0 c^2 + p^2/2m_0 . \quad (19b)$$

Второе слагаемое в (19a) и (19b) — это хорошо известное читателю выражение для кинетической энергии тела, а первое слагаемое есть *энергия покоя тела*; классической механике эта энергия не была известна.

Другой предельный случай отвечает *предельно большим значениям скорости*, когда она приближается к скорости света. При стремлении v к c величина β будет стремиться к 1 и, следовательно, в выражении

$\left(1 + \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right)^{1/2}$, входящем в (***), можно пренебречь первым слагаемым

по сравнению со вторым. Итак, в рассматриваемом случае имеем $E \approx m_0 c^2 \beta / \sqrt{1 - \beta^2}$, откуда с учетом (14) получаем:

$$E \approx pc . \quad (20)$$

На рисунке 3 в таблице 8 соотношение (17) представлено графически в виде сплошной линии, а соотношения (19) и (20) — в виде пунктирных линий.

До создания специальной теории относительности законы сохранения энергии и массы рассматривались как два *самостоятельных* закона сохранения. Теперь же оба эти закона слились в один. По выражению Эйнштейна, масса должна рассматриваться как «сосредоточие колоссального количества энергии».

6.6 ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА КАК ПОВОРОТ ОСЕЙ В ЧЕТЫРЕХМЕРНОМ КОНТИНУУМЕ

Пространство — это *трехмерный континуум*. «Трехмерный» — потому что положение точки определяется в пространстве тремя числами (три пространственных координаты). «Континуум» означает непрерывность — около любой данной точки можно указать сколько угодно других точек, координаты которых могут быть сколь угодно близки к координатам заданной точки. Известно, что все события происходят в пространстве и во времени. В классической физике пространство и время рассматриваются как *самостоятельные* категории, причем время *абсолютно*. Согласно же специальной теории относительности *время нельзя рассматривать независимо от пространства*. Не имеет смысла говорить «сейчас», если не оговорено «где». Время и пространство оказались внутренне взаимосвязанными.

Развивая идеи, высказанные еще в 1905 году Пуанкаре, известный немецкий математик и физик *Герман Минковский* (1884–1909) дал в 1908 году геометрически четкое представление преобразований Лоренца, введя *четырёхмерный пространственно-временной континуум* (четырёхмерный мир Минковского). Всякое физическое событие есть некоторая точка в таком четырёхмерном мире, она определяется четырьмя числами — тремя координатами и временем.

Рассмотрим в некоторой системе отсчета следующие два события: первое — световой сигнал возник в точке $x = y = z = 0$ в момент времени $t = 0$; второе — этот сигнал зафиксирован в некоторой точке x, y, z в момент t . Легко сообразить, что

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0 \quad (21)$$

(сигнал прошел расстояние $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ за время t со скоростью c). Равенство (21) задает в четырёхмерном континууме некоторую «поверх-

ность». Конечно, представить ее, равно как и сам четырехмерный континуум, мы наглядно не можем. Но можно прибегнуть к небольшой хитрости: будем учитывать не три, а лишь две пространственные координаты, а в качестве третьей координаты выберем координату, пропорциональную времени, скажем, величину ct (см. рис. 4 в таблице 8). При этом вместо (21) будем иметь

$$x^2 + y^2 - c^2 t^2 = 0. \quad (22)$$

Равенство (22) задает в изображенном на рисунке «пространстве» коническую поверхность, она ограничивает так называемый *световой конус* (угол между осью ct и образующими конической поверхности равен 45°). События-точки нашего «пространства», для которых $t > 0$, резонно отнести к будущему, а события при $t < 0$ — к прошлому. «Будущие» события, лежащие на поверхности верхней половины светового конуса или внутри него, могут быть причинно связаны с событием в точке $x = y = ct = 0$; поэтому ясно, что любое из тех событий действительно происходит *позже* события в $x = y = ct = 0$. Если же событие с $t > 0$ находится вне светового конуса, то нельзя утверждать, что оно произошло позже события в $x = y = ct = 0$; между этими событиями нет причинной связи. Например, событие A не может быть следствием события O (см. рисунок 4), поэтому невозможно судить, какое из этих двух событий происходит «раньше», а какое «позже». Итак, будущее (по отношению к событию O) ограничено верхней половиной светового конуса, тогда как прошлое — нижней половиной конуса.

Рассмотрим два причинно связанных события, например события O и B на рисунке. Событие O : $x = y = ct = 0$; событие B : x, y, ct . Величину $r = [c^2 t^2 - (x^2 + y^2)]^{1/2}$ называют *интервалом* между указанными событиями. Используя преобразования Лоренца, легко убедиться, что

$$(x')^2 + (y')^2 - (ct')^2 = x^2 + y^2 - (ct)^2. \quad (23)$$

Таким образом, *интервал между событиями остается неизменным при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую*. Это очень важный результат, он требует дополнительного обсуждения.

Что напоминает соотношение (23)? В качестве подсказки предположим сначала, что время не принимается во внимание. Пусть будет

$$(x')^2 + (y')^2 = x^2 + y^2. \quad (24)$$

А теперь обратимся к рисунку 5 в таблице 8. Здесь x и y — координаты конца некоторого вектора в нештрихованной системе, а x' и y' — координаты того же вектора в другой (штрихованной) системе; эти системы

повернуты одна относительно другой на некоторый угол. При повороте системы координатных осей изменяются, как хорошо видно, координаты вектора (его составляющие), но остается неизменным его модуль — это и выражает равенство (24). От двумерного пространства перейдем к трехмерному, где третье измерение связано со временем, и посмотрим на равенство (23) по аналогии с тем, как мы смотрели на (24). Возможно, вызовет смущение минус перед $(ct)^2$. Однако с минусом нетрудно формально справиться, введя мнимую величину $\tau = ict$, где $i = \sqrt{-1}$. Тогда выражение (23) примет вид

$$(x')^2 + (y')^2 + (\tau')^2 = x^2 + y^2 + \tau^2. \quad (25)$$

В общем же (т. е. четырехмерном) случае приходим к соотношению:

$$(x')^2 + (y')^2 + (z')^2 + (\tau')^2 = x^2 + y^2 + z^2 + \tau^2. \quad (26)$$

С учетом сделанных замечаний можно рассматривать полученный результат как сохранение неизменным модуля четырехмерного вектора (его координаты в нештрихованной системе: $x, y, z, \tau = ict$) при повороте осей четырехмерного пространственно-временного континуума. Этот поворот соответствует переходу от нештрихованной системы отсчета к штрихованной (от $x, y, z, \tau = ict$ к $x', y', z', \tau' = ict'$). Таким образом, *преобразования Лоренца для перехода от одной инициальной системы к другой могут рассматриваться формально как чисто геометрическое преобразование — поворот осей*. Но этот поворот выполняется не в трехмерном пространстве, а в *четырёхмерном континууме*. Как отмечал Эйнштейн, «даже нематематику должно быть ясно, что благодаря этому чисто формальному положению теория относительности чрезвычайно выиграла в наглядности и стройности».

6.7 ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО ПОВОДУ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Эта удивительная теория была создана Эйнштейном в течение десяти лет, последовавших за созданием специальной теории относительности (период с 1905 по 1915 год). Почему такой фундаментальный принцип, каким является принцип относительности, должен быть применим лишь к инерциальным системам? Не следует ли вслед за отказом от абсолютного времени отказаться от особой роли инерциальных систем? Из подобных сомнений и выросла, в конечном счете, *общая теория*

относительности, представляющая собой (по сравнению со специальной теорией относительности) следующий и притом очень существенный шаг вперед в понимании фундаментальных проблем, связанных с пространством и временем. Согласно второму закону Ньютона,

$$\text{сила} = \text{инертная масса} \times \text{ускорение},$$

а согласно закону всемирного тяготения,

$$\text{сила} = \text{тяжелая масса} \times \text{напряженность поля тяготения}.$$

Таким образом,

$$\text{ускорение} = \frac{\text{тяжелая масса}}{\text{инертная масса}} \times \text{напряженность поля тяготения}.$$

Эквивалентность тяжелой и инертной масс означает, как можно видеть, *эквивалентность ускорения и поля тяготения*.

Обратимся к знаменитым мысленным экспериментам Эйнштейна. Представим себе свободно падающий в поле тяготения лифт с наблюдателем. Ясно, что у другого наблюдателя, который находится на поверхности Земли и видит падающий вниз лифт, нет никаких сомнений, что лифт движется под действием тяготения. Однако это не очевидно для наблюдателя внутри лифта. Он ощущает невесомость, выпущенный из руки карандаш повисает в воздухе рядом с рукой — нет никаких указаний на тяготение. Тут уместно предоставить слово Эйнштейну:

«Странные вещи происходят в лифте! Если наблюдатель толкает тело в каком-либо направлении, например вверх или вниз, то оно всегда движется прямолинейно и равномерно, пока не столкнется с потолком или полом лифта. Короче говоря, законы классической механики справедливы для наблюдателя внутри лифта. Все тела ведут себя так, как следовало ожидать по закону инерции... Внешний наблюдатель замечает движение лифта и всех тел в нем, и находит его соответствующим закону тяготения Ньютона. Для него движение является не равномерным, а ускоренным, вследствие действия поля тяготения Земли. Однако поколение физиков, рожденное и воспитанное в лифте, рассуждало бы совершенно иначе. Оно было бы уверено в том, что оно обладает инерциальной системой, и относило бы все законы природы к своему лифту, заявляя с уверенностью, что законы природы принимают особенно простую форму в их системе координат. Для них было бы естественно считать свой лифт покоящимся и свою систему координат инерциальной».

На минуту отвлечемся от примера с лифтом, рассматриваемого Эйнштейном, и заметим, что нас не должна смущать скоротечность жизни наблюдателя в лифте и, в частности, замечание о «поколении физиков, рожденном

и воспитанном в лифте». Лифт вполне можно заменить искусственным спутником Земли, достаточно просторным, чтобы внутри него можно было поселить и воспитать целое поколение наблюдателей. Кружась сколь угодно долго по орбите вокруг Земли, они будут *все время падать вместе со спутником в поле тяготения Земли*. Но вернемся к Эйнштейну:

«Из этого примера мы видим, что последовательное описание физических явлений в двух различных системах возможно, даже если они не движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Но для такого описания мы должны принять во внимание тяготение, создающее, так сказать, «мост», позволяющий перейти от одной системы к другой. Поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего наблюдателя оно не существует. Ускоренное движение лифта в поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего же наблюдателя — покой и отсутствие поля тяготения. Но «мост», т.е. поле тяготения, делающий описание в обеих системах возможным, покоится на одной очень важной опоре: *эквивалентности тяжелой и инертной масс*. Без этой руководящей идеи, оставшейся незамеченной в классической механике, наши терпешние рассуждения полностью отпали бы».

Рассмотрим еще один мысленный эксперимент Эйнштейна. К лифту, который до того покоился в инерциальной системе отсчета, кто-то извне привязал канат и стал тянуть лифт в какую-то сторону с постоянной силой. С точки зрения внешнего наблюдателя (находящегося в инерциальной системе), лифт движется с постоянным ускорением. С точки же зрения наблюдателя внутри лифта, нет движения с ускорением, а есть некоторое поле тяготения. Итак, один полагает неравномерность движения и отсутствие тяготения, а другой — покой и наличие тяготения. Эйнштейн считает, что принципиально невозможно доказать правоту того или иного наблюдателя. Можно было бы, например, пропустить сквозь лифт горизонтальный световой луч (полагаем при этом, что ускорение лифта направлено вверх). Внешний наблюдатель скажет: световой луч движется горизонтально, но лифт движется вверх и, значит, он сместится немного вверх за тот промежуток времени, какой требуется лучу, чтобы пройти расстояние от одной стенки лифта до другой. Поэтому луч упадет на заднюю стенку в точке, которая находится немного ниже точки входа луча на передней стенке. Казалось бы, вот доказательство истинности позиции внешнего наблюдателя. Но не следует спешить с таким заключением. Наблюдатель внутри лифта может заметить, что луч света несет энергию, а энергия имеет массу. На всякую инертную массу поле тяготения оказывает воздействие, так как инертная и тяжелая массы эквивалентны. Луч света будет искривляться в поле тяготения точно так же, как искривляется траектория тела, брошенного горизонтально (см. рисунок 6 в таблице 8).

Таков был путь Эйнштейна к *принципу эквивалентности* — центральному стержню общей теории относительности. Об этом принципе хорошо сказал *Гарднер* в уже упоминавшейся книге «Теория относительности для миллионов»: «Принцип эквивалентности не что иное, как ошеломляющее утверждение, что тяжесть и инерция одно и то же (Ньютон считал бы Эйнштейна безумцем). Это даже не просто похожие явления. Тяжесть и инерция — два различных слова для одного и того же явления».

В свое время Ньютон, сформулировав закон всемирного тяготения, не смог объяснить причину тяготения. Общая теория относительности Эйнштейна дала тяготению неожиданное объяснение. В пустом пространстве тело движется по инерции прямолинейно и равномерно потому, что в таком пространстве кратчайшее расстояние между двумя точками — прямая линия. Представим себе теперь, что в пространстве появилась значительная масса. Мы говорим, что теперь тело движется под действием силы тяжести, обусловленной полем тяготения, возникшим вместе с упомянутой массой. Но можно, оказывается, рассуждать иначе: масса изменяет структуру самого пространства — она как бы *искривляет* его, делая кратчайшим расстоянием между двумя точками уже не прямую, а кривую линию. Подчеркнем: тяготение — не причина кривизны пространства, это и есть сама кривизна. Структура пространства, его кривизна определяется кривизной его геодезических линий. С точки зрения общей теории относительности, движение тела в поле тяготения можно рассматривать как *движение по инерции вдоль искривленной геодезической линии*. Поистине инерция и тяжесть оказались двумя сторонами одной и той же медали.

Искривление пространства тем сильнее, чем больше вызывающая это искривление масса; следовательно, свойства пространства и времени должны рассматриваться *в теснейшей связи с материей*. В классической механике время рассматривалось независимо от пространства, а пространство и время рассматривались независимо от материи. Существовали абсолютное время и абсолютное пространство, в которые была «погружена» материя. Теория относительности потребовала решительно пересмотреть такую точку зрения. На первом этапе (специальная теория относительности) она продемонстрировала *взаимосвязь пространства и времени*, показала, что нет времени вне пространства. На втором этапе (общая теория относительности) была показана *взаимосвязь пространства—времени с материей*. В сильных полях тяготения не только происходит искривление геодезических линий, но и замедляется ход времени.

В заключение остановимся на одном (далеко не единственном) свидетельстве справедливости общей теории относительности — на наблюдаемом современными астрономами эффекте *гравитационной линзы*. Так условно называют предсказываемое

теорией относительности искривление световых лучей вблизи массивного тела. Благодаря этому искривлению лучей в поле тяготения Солнца можно наблюдать при полном солнечном затмении некоторые звезды, которые согласно точным вычислениям находятся в это время за краем солнечного диска. Эффектный пример гравитационной линзы был обнаружен в 1979 году, когда были открыты два близко расположенных и очень похожих друг на друга квазара. Они различались по угловому расстоянию всего на 6 угловых секунд, что соответствует трем тысячным видимого диаметра Луны. Это было удивительно, поскольку все известные квазары распределены по небосводу достаточно равномерно со средним угловым расстоянием между соседями около нескольких градусов. Еще более удивительным было полное совпадение спектров обоих квазаров. В настоящее время установлено, что указанная пара квазаров — это два изображения одного и того же квазара, полученные благодаря существованию в космическом пространстве мощной гравитационной линзы, создаваемой галактикой, расположенной между Землей и загадочным «двойным» квазаром.

ИНТЕРМЕДИЯ: РАЗМЫШЛЕНИЯ О КРИЗИСЕ ФИЗИКИ НА РУБЕЖЕ XIX И XX СТОЛЕТИЙ И ЕГО ПРИЧИНАХ

Свершились все мечты, что были так далёки.
Победный ум прошел за годы сотни миль.
При электричестве пишу я эти строки,
И у ворот, гудя, стоит автомобиль.

Валерий Брюсов

Люди, стоящие в стороне от научной работы, поражаются кажущейся эфемерностью научных теорий. Они видят их постоянный упадок после нескольких лет процветания, видят нагромождение всё новых руин, предвидят, что и модные теперь теории в свою очередь скоро подвергнутся той же судьбе, и выводят отсюда заключение об их полной бесполезности. Они называют это банкротством науки.

Жюль Анри Пуанкаре

Открытие принципов сохранения энергии и возрастания энтропии, впечатляющие достижения в области электромагнетизма, оптики, термодинамики — все это порождало у физиков в конце XIX столетия иллюзию полного торжества человеческого разума (уже отмечавшийся нами

ранее эффект *абсолютизации знаний*). Казалось, физика как наука, исследующая первоначала вещей и первопричины явлений, находится уже на *завершающем этапе своего развития*, что описание законов природы должно вскоре принять всеобъемлющую и *окончательную* форму. Вспоминая о начале своей научной деятельности, Макс Планк привел характерное для того времени (шел 1880-й год) мнение своего учителя Ф. Жолли по поводу перспективности занятий физикой. Эти занятия, как полагал Жолли, перспективы не имеют, поскольку физика есть почти завершенная наука, которая после открытия закона сохранения энергии приблизилась к той степени совершенства, какую вот уже столетия обладает геометрия. Отражением этих настроений следует считать предложение выдающегося немецкого математика *Давида Гильберта* (1862–1943), рассмотреть проблему *аксиоматизации всей физики*, т. е. сформулировать конечное число исходных аксиом, из которых чисто логическим путем можно было вывести все следствия, достаточные для *полного* (исчерпывающего) описания физической картины мира. Именно такова была шестая из двадцати трех знаменитых проблем, выдвинутых Гильбертом в августе 1900 года на Втором Международном конгрессе математиков.

А между тем открытия, сделанные в относительно короткий период (с 1885 по 1905 год), указывали на то, что *ни о каком завершении физической науки не может быть и речи*. Эти открытия вступали в противоречие с существовавшими концепциями и, как тогда представлялось, расшатывали и даже опровергали многие «старые принципы». На еще недавно ясном физическом небосклоне вдруг появилось много облаков, грозивших затянуть весь небосклон.

Приведем неполный перечень наиболее важных открытий, сделанных в течение упомянутых двух десятилетий. В 1885 году *И. Бальмер* обнаружил закономерность в открытой им серии спектральных линий водорода. Интенсивные исследования в области спектроскопии газов привели в последующие годы к открытию линейчатых спектров не только водорода, но и других элементов. В 1887 году *Г. Герц* открыл фотоэффект. В 1888 году это явление было переоткрыто и независимо исследовано *В. Гальваксом*, *А. Риги*, *А.Г. Столетовым*. В 1887 году *А. Майкельсон* экспериментально доказал несостоятельность гипотезы неподвижного эфира. В 1895 году *В. Рентген* открыл новый вид излучения, которое он назвал икс-лучами; позднее это излучение стали называть рентгеновским. В 1896 году *А.А. Беккерель* открыл явление радиоактивности, 1897-й год вошел в историю физики как год открытия *Дж.Дж. Томсоном* электрона; в этом году было измерено отношение заряда электрона к его массе. В 1898 году *М. Кюри-Склодовская* открыла радиоактивность тория. В том же году она совместно с *П. Кюри* открыла еще два радиоактивных элемента — полоний и радий. В 1900 году *М. Планк* пришел к выводу, что

электромагнитное излучение испускается телами не непрерывно, а в виде порций энергии (квантов энергии). В 1902–1903 годах *Ф. Содди* совместно с *Э. Резерфордом* разработали теорию радиоактивного распада и экспериментально доказали превращаемость химических элементов. В 1902 году *В. Кауфман* экспериментально установил зависимость массы электрона от скорости. В 1905 году *А. Эйнштейн* сформулировал специальную теорию относительности и, кроме того, объяснил загадки фотоэффекта.

Новые открытия явно не укладывались в рамки сформировавшихся представлений. Впервые в физике вещества была обнаружена *дискретность* величин; она проявилась в линейчатых спектрах газов, потребовалась для объяснения законов фотоэффекта и теплового излучения. Физики привыкли к тому, что физические величины изменяются непрерывным образом; идея дискретности была для них нова и казалась «безумной». Выяснилось, что такой привычный, хотя и несколько загадочный эфир попросту не существует. В то же время появилось совершенно неизвестное ранее икс-излучение; непонятно было, куда следовало отнести это новое излучение, какова его природа. Химические элементы всегда представлялись неизблемыми, стабильными; теперь же обнаружилось, что они могут *взаимопревращаться* (как если бы вдруг стали сбываться мечты средневековых алхимиков). Было непонятно, откуда берется энергия, высвобождающаяся при радиоактивном распаде. В связи с этим возникали *сомнения в справедливости закона сохранения энергии*. Да и как было не усомниться, коль скоро пришлось убедиться в несостоятельности закона сохранения массы (ведь масса электрона зависит от его скорости!).

Создавалось впечатление, что рушатся фундаментальные законы. Это впечатление, казалось, подтверждала специальная теория относительности, требовавшая отказа от абсолютности таких понятий, как одновременность событий, промежуток времени, протяженность тела в пространстве, устанавливавшая наличие универсальной связи между энергией и массой.

Выступая на Международном Конгрессе физиков в 1900 году, Пуанкаре, говоря об открытии катодных лучей, икс-лучей, радиоактивного излучения урана и радия, подчеркивал: «Тут целый мир, о существовании которого никто и не догадывался. Всех этих неожиданных гостей надо определить к месту!» Позднее, в 1904 году, он прямо заявляет: «*Имеются признаки серьезного кризиса*». Развивая свою мысль, он указывает на то, что *под сомнение поставлены основополагающие принципы*: принцип сохранения энергии, принцип Карно (второе начало термодинамики), принцип сохранения массы, принцип равенства действия противодействию.

Мы обратились к Пуанкаре не случайно. Поучителен тот вывод, к которому в итоге приходит ученый. Подобно многим физикам тех лет, он фактически переходит на *идеалистические* позиции физического релятивизма, заявляя, что наука исследует *не сущность вещей, а лишь отношения*. Вот что он пишет:

«Что мы видим? Сначала нам представляется, что теории живут не более дня и что руины нагромождаются на руины. Сегодня теория родилась, завтра она в моде, послезавтра она делается классической, на третий день она устарела, а на четвертый — забыта. Но если всмотреться ближе, то увидим, что так именно падают, собственно говоря, те теории, которые имеют притязание открыть нам сущность вещей. Однако в теориях есть нечто, что чаще всего выживает. Если одна из них открыла нам истинное отношение, то это отношение является окончательным приобретением: мы найдем его под новым одеянием в других теориях, которые будут последовательно водворяться на ее место... В итоге единственной объективной реальностью являются отношения вещей, из которых вытекает мировая гармония».

Как тут не вспомнить Платона, который утверждал, что *мир вещей* — это не более как мир теней, являющихся *отражениями вечных отношений, вечных идей*. Замена самих вещей отношениями вещей, «из которых вытекает мировая гармония» — прямой путь к идеализму. И Пуанкаре проходит его до конца:

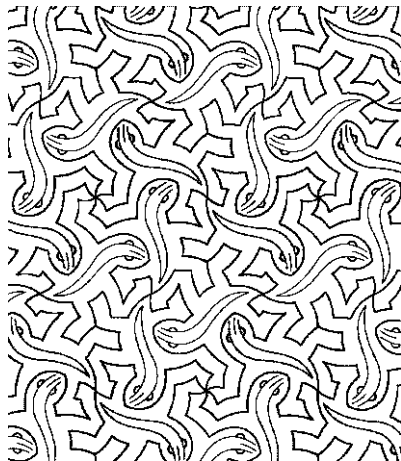
«Все, что не есть мысль, есть чистое ничто, ибо мы не можем мыслить ничего, кроме мысли, и все слова, которыми мы располагаем для разговора о вещах, не могут выражать ничего, кроме мыслей. Поэтому сказать, что существует нечто иное, чем мысль, значило бы высказать утверждение, которое не может иметь смысла... Жизнь есть лишь беглый эпизод между двумя вечностями смерти, и в этом эпизоде прошедшая и будущая длительность сознательной мысли — не более, как мгновение. Мысль — только вспышка света посреди долгой ночи. Но эта вспышка — все».

В своей книге «Материализм и эмпириокритицизм» (1909) *Владимир Ильич Ленин* отмечал, что «суть кризиса современной физики состоит в ломке старых законов и основных принципов, в отбрасывании объективной реальности вне сознания, т. е. в замене материализма идеализмом и агностицизмом». Ленин подчеркивал: «Разрушимость атома, неисчерпаемость его, изменчивость всех форм материи и ее движения всегда были опорой диалектического материализма. *Все грани в природе условны, относительны, подвижны*, выражают приближение нашего ума к познанию материи, — но это нисколько не доказывает, чтобы природа, материя сама была символом, условным знаком, т. е. продуктом нашего ума» (курсив наш. — Л.Т.).

Анализируя *причины* кризиса физики, Ленин писал: «*Новая физика свихнулась в идеализм главным образом потому, что физики не знали диалектики*». Он указывал также: «Реакционные поползновения порождаются самим прогрессом науки. Крупный успех естествознания, приближение к таким однородным и простым элементам материи, законы движения которых допускают математическую обработку, порождает забвение материи математиками. Материя исчезает — остаются одни уравнения. На новой стадии развития и, якобы, по-новому получается старая кантианская идея: разум предписывает законы природе».

Ленинский анализ причин кризиса физики — это анализ самых общих причин. Не будучи физиком, Ленин, естественно, не конкретизировал эти причины. Миропонимание подавляющего большинства ученых XIX столетия тяготело к *механистическому* представлению и описанию природных явлений — и это наилучшим образом согласовывалось с материалистическим подходом к действительности. Неожиданные научные открытия на рубеже XIX–XX веков были восприняты как сенсационные прежде всего потому, что требовали *решительного отказа от механицизма*, который к тому времени уже и так был основательно дискредитирован введением в науку понятия физического поля. С учетом *последующих* событий, полностью подтвердивших ленинский прогноз того, что «материалистический основной дух физики, как и всего современного естествознания, победит все и всяческие кризисы, но только с неперменной заменой материализма метафизического материализмом диалектическим», мы можем сегодня утверждать, что к кризису на рубеже двух столетий привело физиков, по большому счету, *неприятие ими вероятностных закономерностей фундаментальных, лежащих в самой природе вещей и выражающих диалектику необходимого и случайного*.

Конечно, кризис был преодолен, но на этом и завершилась длительная эпоха царствования закономерностей динамического типа. Апофеозом явилась теория относительности Эйнштейна — блистательная и в то же время *последняя* динамическая теория. Все дальнейшее развитие физики и естествознания вообще происходило в XX столетии в процессе разработки только вероятностных (статистических) теорий.



НЕ ЗАМЕЧЕННОЕ СОВРЕМЕННОКАМИ ПОЯВЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ В БИОЛОГИИ: РОЖДЕНИЕ ГЕНЕТИКИ

Если мне и приходилось переживать горькие часы, то прекрасных, хороших часов, выпало гораздо больше. Мои научные труды доставили мне много удовлетворения, и я убежден, что не пройдет много времени — и весь мир признает результаты моих трудов.

Грегор Иоганн Мендель (1822–1884)

Письмо основоположника учения
о наследственности, создателя генетики

Г. Менделя, датированное
1 октября 1883 года.

Справка. *Ген* (от греческого «генос» — «род, происхождение») — единица наследственного материала, ответственная за формирование какого-либо элементарного признака. Ген — участок молекулы ДНК; входит в состав одной из *хромосом*. Совокупность всех генов организма составляет его *генотип*. Его можно рассматривать как наследственную конституцию организма, его генетическую программу. *Фенотип* — совокупность всех признаков и свойств организма, сформировавшихся в процессе его индивидуального развития на основе его генетической

программы; складывается в результате взаимодействия наследственных свойств организма (генотипа) и условий среды обитания. Термины «ген», «генотип», «фенотип» ввел в 1909 году известный датский биолог *Вильгельм Людвиг Иогансен* (1857–1927).

7.1 ОТ ЛАМАРКА К ДАРВИНУ

В 1809 году вышла в свет «Философия зоологии» выдающегося французского естествоиспытателя *Жана Батиста Ламарка* (1744–1829). В этом труде была предпринята первая серьезная попытка создания теории эволюции видов. Попытка оказалась неудачной. Создавая свою теорию, Ламарк исходил из двух ошибочных идей. Во-первых, он полагал, что во всех живых существах заложено внутреннее стремление к совершенствованию. В этом он усматривал движущую силу эволюции. Конечно, никакой таинственной внутренней силы, заставляющей все виды эволюционировать в направлении прогресса, не существует. Если, разумеется, не принимать во внимание вмешательство «творца». Во-вторых, Ламарк считал, что внешняя среда непосредственным образом влияет на изменение формы тех или иных органов живых существ. Когда-то появились на Земле жирафы с короткой шеей. По каким-то причинам изменились условия их обитания. Пища оказалась высоко над поверхностью (листва высоких деревьев). Чтобы добраться до нее, жирафам приходилось все время тянуть кверху шею. Это происходило из поколения в поколение. В результате длительных упражнений шея жирафов вытянулась. Ламарк сформулировал следующий закон:

«У каждого животного, не завершившего еще своего развития, более частое и продолжительное употребление какого-нибудь органа укрепляет этот орган, развивает его, увеличивает его и придает ему силу, пропорциональную продолжительности употребления, тогда как постоянное отсутствие употребления какого-либо органа постепенно его ослабляет, приводит к упадку, непрерывно уменьшает его способности и, наконец, заставляет его исчезнуть».

Ламарк глубоко заблуждался. Известно, что натренированные мышцы, равно как и приобретенные навыки, *по наследству не передаются*. Используя современную терминологию, можно сказать, что Ламарк не понимал различия между *фенотипом* и *генотипом* организма. Фенотип действительно изменяется в течение жизни организма в зависимости от поведения организма и условий среды обитания. Все это, однако, не влияет на генотип.

Эволюционная теория была создана великим английским естествоиспытателем *Чарлзом Робертом Дарвином* (1809–1882). Эта теория получила название *дарвинизма*. Она была изложена в книге «Происхождение видов путем естественного отбора» (1859). Согласно теории Дарвина, *эволюция происходит путем естественного отбора случайно возникших мутаций, формирующего комбинации признаков и свойств, которые обеспечивают адаптацию организмов к условиям внешней среды.*

Внешняя среда, воздействуя на организм, может приводить к случайным изменениям (*мутациям*), которые передаются по наследству и накапливаются в потомстве. Некоторые мутации случайно оказываются более благоприятными с точки зрения приспособления организмов к условиям внешней среды, другие оказываются менее благоприятными, третьи вообще вредными. И тут начинает проявляться действие *естественного отбора*. Организмы, оказавшиеся менее приспособленными, дают меньшее потомство, преждевременно погибают; в конечном счете, их вытесняют *более приспособленные*.

Рассматривая эволюцию видов, Ламарк признавал, по сути дела, лишь *необходимость*. Изменились условия среды — и организм за счет упражнений соответствующих органов необходимым образом видоизменяется. Такая «эволюция» с необходимостью идет *только* в направлении усложнения организации видов, как если бы в них действительно было заложено внутреннее стремление к прогрессу.

Дарвин же рассматривал эволюцию с позиций *диалектического единства необходимого и случайного*. Безразличная природа вызывает в организмах случайные наследственные изменения, затем через естественный отбор отсекает тех, кто случайно оказался неприспособленным, и оставляет остальных. Развитие идет по пути отбора не более сложно организованных, а *более приспособленных организмов и видов*. В итоге и возникло; наблюдаемое ныне многообразие видов животных и растений (около 1,5 миллионов видов животных и 0,5 миллиона видов растений).

Обо всем этом мы уже говорили в теме 11 в книге «Вероятность в современном обществе» см. 11.5.1 («Решающая роль мутаций»), 11.5.2 («Многообразие видов как результат длительной эволюции»), 11.5.3 («Почему эволюция идет в целом в направлении постепенного усложнения видов?»).

Учение Дарвина получило всеобщее признание уже при жизни ученого. Но было в этом учении одно «больное место», на которое указал Дарвину в 1867 году преподаватель из Эдинбурга *Флеминг Дженкинс*. Он заметил, что в дарвинской теории нет ясности в вопросе о том, как осуществляется накопление в потомстве тех или иных изменений признаков. Ведь вначале изменения признака происходят лишь

у некоторых особей. Эти особи скрещиваются с нормальными особями. В результате, утверждал Дженкинс, должно наблюдаться не *накопление* измененного признака в потомстве, а напротив, его *разбавление*, постепенное стирание — вплоть до исчезновения. В первом поколении потомства остается $1/2$ изменения, во втором поколении $1/4$ изменения, в третьем $1/8$ изменения и т. д.

В течение пятнадцати лет, до самой своей кончины, Дарвин размышлял над вопросом, поставленным Дженкинсом, но так и не нашел решения проблемы.

А между тем это решение существовало уже в 1865 году. Его получил преподаватель монастырской школы в Брюнне (Чехия) *Грегор Иоганн Мендель*. Увы, Дарвин ничего не знал об исследованиях Менделя. Он так никогда и не узнал о них.

7.2 Опыты ГРЕГОРА МЕНДЕЛЯ; ОТКРЫТИЕ ГЕНЕТИКИ

Свои ставшие впоследствии знаменитыми опыты с горохом Мендель начал проводить за несколько лет до выхода в свет «Происхождения видов». Когда появилась книга Дарвина, он внимательно прочитал ее и в дальнейшем живо интересовался всеми работами Дарвина. Говорят, что однажды Мендель заметил по поводу дарвинской теории: «Это еще не все, еще чего-то здесь не хватает». Исследования Менделя как раз и были направлены на то, чтобы заделать «бреешь» в теории Дарвина. Мендель занимался гибридизацией; объектом исследования он выбрал горох.

Мендель взял два сорта гороха — с желтыми и с зелеными семенами. Скрестив эти два сорта, он обнаружил в *первом поколении* гибридов горох *только* с желтыми семенами (впоследствии этот факт получил название *закона единообразия первого поколения*). Затем ученый произвел самоопыление полученных гибридов и получил *второе поколение* гибридов. В этом поколении снова появились особи с зелеными семенами. Правда, их оказалось заметно меньше, чем с желтыми семенами. Мендель *тщательно подсчитал* количество тех и других и обнаружил, что число особей с желтыми семенами относится к числу особей с зелеными семенами как

$$x : y = 6022 : 2001 = 3,01 : 1.$$

Параллельно Мендель проводил еще шесть опытов. В каждом опыте он использовал два сорта гороха, различавшихся по какому-либо *одному* определенному признаку. Так, в одном из опытов он скрестил горох с

гладкими семенами и горох с морщинистыми семенами. В первом поколении гибридов он наблюдал только растения с гладкими семенами. Во втором поколении появились также растения с морщинистыми семенами. Отношение числа особей с гладкими семенами к числу особей с морщинистыми семенами составило

$$x : y = 5474 : 1850 = 2,96 : 1.$$

В остальных пяти опытах скрещивались сорта, различающиеся либо по окраске кожуры, либо по форме плода, либо по его окраске в незрелом состоянии, либо по расположению цветков, либо по размерам растений (*карлики и гиганты*). В каждом опыте в первом поколении гибридов проявился только один из двух противоположных родительских признаков (действовал закон единообразия первого поколения). Мендель назвал этот признак *доминантным*. Другой признак, тот, который временно исчезал, он назвал *рецессивным*. Отношение $x : y$ числа особей с доминантным признаком к числу особей с соответствующим рецессивным признаком среди гибридов второго поколения для двух опытов мы уже приводили. В остальных пяти опытах Мендель получил:

$$x : y = 705 : 224 = 3,15 : 1,$$

$$x : y = 882 : 299 = 2,95 : 1,$$

$$x : y = 428 : 152 = 2,82 : 1,$$

$$x : y = 651 : 207 = 3,14 : 1,$$

$$x : y = 787 : 277 = 2,84 : 1.$$

Во всех случаях отношение $x : y$ оказалось достаточно близким к отношению 3 : 1.

В итоге Мендель мог с достаточным основанием сделать три утверждения. Во-первых, при скрещивании растений с противоположными признаками происходит не разбавление признаков (как полагал Дженкинс), а *подавление одного признака другим*; в связи с этим важно различать *доминантные* и *рецессивные* признаки. Во-вторых, в гибридах первого поколения проявляется только доминантный признак, а рецессивный признак полностью подавлен (*закон единообразия гибридов первого поколения*). В-третьих, гибриды первого поколения при размножении самоопылением *расщепляются*; во втором поколении появляются особи как с доминантным, так и рецессивным признаками, причем *отношение числа первых к числу вторых равно примерно 3 : 1* (этот закон известен ныне как *закон расщепления*).

Мендель был достаточно образованным человеком; он преподавал в монастырской школе физику и математику, интересовался теорией

вероятностей. Он должен был обратить внимание на *вероятностный характер* закона расщепления. В первом и втором опытах количество измерений было достаточно велико (около 8000), а в остальных опытах заметно меньше (от 600 до 1000). В результате отклонение отношения $x:y$ от $3:1$ в первых двух опытах оказалось порядка 0,01 тогда как в остальных пяти опытах — порядка 0,1.

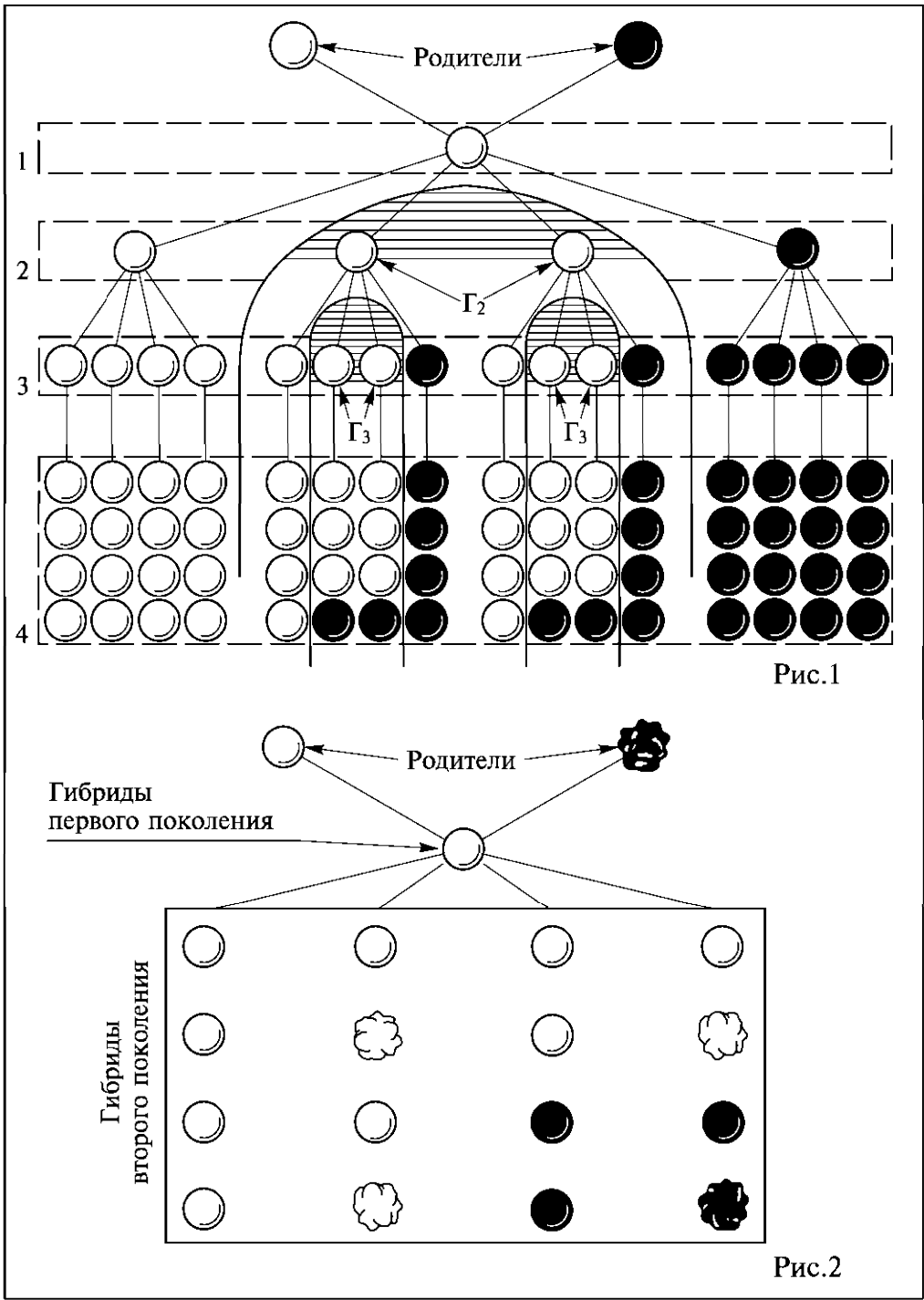
Мендель не ограничился рассмотренными опытами. Он продолжил исследования, произвел самоопыление гибридов второго поколения и получил гибриды третьего поколения, затем произвел самоопыление гибридов третьего поколения и получил гибриды четвертого поколения. Ученый обнаружил, что гибриды второго поколения с рецессивным признаком при дальнейшем размножении не расщепляются ни в третьем, ни в четвертом поколениях. Треть гибридов второго поколения с доминантным признаком также не расщепляются при дальнейшем размножении ни в третьем, ни в четвертом поколениях. Оставшиеся две трети гибридов второго поколения с доминантным признаком расщепляются при переходе к гибридам третьего поколения, причем опять-таки в отношении $3:1$. Получившиеся в результате этого расщепления гибриды третьего поколения с рецессивным признаком и треть гибридов с доминантным признаком при переходе к четвертому поколению гибридов не расщепляются, а остальные гибриды третьего поколения расщепляются, причем снова в отношении $3:1$.

Явление расщепления гибридов демонстрирует важное обстоятельство: особи с одинаковыми внешними признаками (с одинаковым фенотипом) могут обладать разными наследственными свойствами (разными генотипами), что и обнаруживается в фенотипах (внешних признаках) их потомства. Мы видим, что *по фенотипу нельзя судить с достаточной полнотой о генотипе*.

Если особь не обнаруживает в потомстве расщепления, то ее называют *гомозиготной*. Если же при размножении она обнаруживает расщепление, то ее называют *гетерозиготной*.

Полученные Менделем результаты по скрещиванию в случаях, когда родительские организмы отличаются друг от друга по *одному изучаемому признаку* (такое скрещивание называют *моногибридным*), хорошо просматриваются на рисунке 1 в таблице 9. Рисунок делает предельно ясными сделанные выше замечания по поводу гибридов первого, второго, третьего и четвертого поколений. Пусть в качестве изучаемого признака выбран цвет семян (желтый — доминантный; зеленый — рецессивный). На рисунке 1 белые шарики — это желтые горошины, а черные шарики — зеленые горошины; цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены гибриды

Таблица 9. Результаты опытов Грегора Менделя



первого, второго, третьего и четвертого поколений соответственно; Γ_2 — гетерозиготные особи во втором поколении, Γ_3 — гетерозиготные особи в третьем поколении. Глядя на этот рисунок легко обнаружить закономерности, о которых было сказано выше. Они выражают менделевский *закон расщепления*.

Скрещивание, в котором участвуют особи, отличающиеся по *двум признакам*, называют *дигибридным*. На рисунке 2 в таблице 9 показаны результаты опытов Менделя по дигибридному скрещиванию с рассмотрением гибридов первого и второго поколений. В качестве одного из двух признаков взят *цвет* семени гороха (желтый — доминантная разновидность цвета, зеленый — рецессивная разновидность цвета). В качестве другого признака взята форма семени (гладкая — доминантная разновидность формы, морщинистая — рецессивная разновидность). Из рисунка видно, что в первом поколении гибридов наблюдались только *желтые гладкие* горошины (т. е. горошины, у которых оба признака представлены доминантными разновидностями). Во втором поколении гибридов наблюдается *расщепление* гибридов: на рисунке хорошо различаются *желтые гладкие* горошины (показаны белым цветом), *зеленые гладкие* горошины (черный цвет), *желтые морщинистые* горошины (белый цвет), *зеленые морщинистые* горошины (черный цвет).

Само по себе расщепление гибридов во втором поколении удивления уже не вызывает. Однако здесь обнаруживается еще одна закономерность. Чтобы усмотреть ее, подсчитаем, глядя на рисунок 2, отношение числа желтых семян (независимо от их формы) к числу зеленых семян (также независимо от их формы). Это отношение равно $12 : 4 = 3 : 1$. А теперь подсчитаем, глядя на рисунок, отношение числа гладких семян (независимо от их цвета) к числу морщинистых семян (также независимо от их цвета). Это отношение тоже равно $12 : 4 = 3 : 1$. Мы видим, что *наследование по каждому из признаков происходит независимым образом*. Так Мендель установил еще один закон наследования; ныне его называют *законом независимого комбинирования (наследования) признаков*.

Заметим, что наблюдения над гибридами производились и до Менделя. Для примера приведем записи современника Менделя *Шарля Нодэна*, работавшего садовником в Ботаническом саду в Париже:

«Начиная со второго поколения, облик гибридов изменяется заметным образом. Столь совершенное единообразие гибридов первого поколения сменяется обычно крайней пестротой форм, одни из которых приближаются к видовому типу отца, другие — матери...»

Но до Менделя никто не предпринял систематизированных исследований с учетом отдельных выделенных признаков, с подсчетом чисел прояв-

лений тех или иных признаков в различных поколениях гибридов. Мендель был первым, кто все это проделал, потратив на опыты восемь лет. В отличие от своих предшественников, Мендель понял *важнейшие закономерности наследственной передачи признаков*. С трех законов Менделя и началась новая наука, называемая ныне *генетикой*.

Результаты своих исследований Грегор Мендель доложил в феврале 1865 года Обществу естествоиспытателей в Брюнне. Слушатели не поняли всей важности представленного им доклада. Какое отношение имеет вся эта математика к ботанике? Как понимать настойчиво повторяющееся соотношение «три к одному»? Уж не пытается ли этот монах-августинец проташить в науку что-то вроде догмата Пресвятой Троицы? Доклад Менделя был встречен недоуменным молчанием. Вопросов не было.

В 1866 году доклад Менделя был опубликован в сокращении под скромным названием «Опыты над растительными гибридами» в Брюннском бюллетене и разослан по списку 120 научным учреждениям разных стран. К сожалению, Дарвин этого бюллетеня не получил.

Мир давно признал Грегора Менделя как основателя генетики. Это признание пришло лишь в 1900-м году, через пятнадцать лет после кончины талантливого исследователя. В том году законы Менделя были переоткрыты независимо друг от друга тремя учеными — нидерландским ботаником *Хуго Де-Фризом* (1848–1935), немецким ботаником *Карлом Эрихом Корренсом* (1864–1933), австрийским естествоиспытателем *Эрихом Чёрмак-Зейзенёггом* (1871–1962). Все они признали приоритет *Грегора Иоганна Менделя*.

7.3 ХРОМОСОМЫ, ГЕНЫ, АЛЛЕЛИ

Напомним читателю некоторые сведения из цитологии и генетики.

Различают два типа клеток — *половые клетки (гаметы)* и *соматические клетки*. В ядре каждой клетки находятся нитевидные *хромосомы*, представляющие собой гигантские *молекулы ДНК* в соединении с молекулами белков. В хромосомах, а точнее, в молекулах ДНК содержится вся информация, определяющая генотип данного организма (вся наследственная информация). Отдельные участки хромосомы, «ответственные» за те или иные наследственные признаки, называют *генами*. Каждая хромосома содержит несколько сотен генов. Иногда хромосому упрощенно представляют в виде своеобразной «нити», на которую, словно бусинки, нанизаны различные гены.

Каждому виду соответствует *свой определенный набор хромосом*; он определяется количеством хромосом и их генными характеристиками. Например, у овса имеются 42 хромосомы, у плодовой мушки дрозофилы 8 хромосом, у шимпанзе 48 хромосом, у человека 46 хромосом.

Ядро каждой соматической клетки содержит полный набор хромосом, соответствующий данному виду. Это означает, что *в каждой клетке организма содержится вся наследственная информация*.

Приведенные выше для некоторых видов количества хромосом характеризуют хромосомные наборы в соматических клетках, но отнюдь не в половых клетках. Каждая половая клетка (гамета) имеет в два раза меньше хромосом, чем соматическая клетка.

Рассмотрим подробнее хромосомный набор соматической клетки. Он представляет собой набор, состоящий из *пар хромосом*; одна пара — это *пара половых хромосом*, остальные пары — так называемые *пары аутосом*. Так, 46 хромосом человека представляют собой набор из одной пары половых хромосом и 22 пар аутосом; 8 хромосом дрозофилы представляют собой набор из одной пары половых хромосом и всего трех пар аутосом. У женских особей обе половые хромосомы *одинаковые* (две X-хромосомы), у мужских особей половые хромосомы *разные* (одна X-хромосома и одна Y-хромосома). Каждая из аутосом, находящихся в одной и той же паре, имеет одну и ту же форму и содержит одинаковое число генов, одинаковым образом расположенных в той и другой хромосомных нитях, а главное, отвечающих за одни и те же виды признаков. Говорят, что такие аутосомы *гомологичны*.

У каждого гена, отвечающего за тот или иной признак, есть две разновидности — *доминантная и рецессивная*. Мы уже говорили в предыдущем параграфе о двух разновидностях цвета горошин (доминантном желтом и рецессивном зеленом) и о двух разновидностях формы горошин (доминантной гладкой и рецессивной морщинистой). Две разновидности гена называют *аллелями* (от греческого «аллелон» — «друг друга, взаимно»). Говорят о *доминантном аллеле* данного гена и о *рецессивном аллеле* гена. Если в обеих аутосомах, входящих в одну и ту же пару, рассматриваемый ген представлен *одинаковыми аллелями*, то данная особь *гомозиготна* по тому признаку, который представляет рассматриваемый ген. Если же в одной аутосоме содержится один аллель гена, а в другой аутосоме из той же пары содержится противоположный аллель *рассматриваемого гена*, то данная особь *гетерозиготна по соответствующему признаку*. В фенотипе этой особи проявляется разновидность признака, отвечающая доминантному аллелю гена.

Теперь рассмотрим хромосомный набор гаметы (половой клетки). Он *не разбивается на пары хромосом*. В нем имеется только одна половая хромосома. У женской особи это всегда X-хромосома. У мужской особи это может быть либо X-хромосома (в одних гаметах), либо Y-хромосома (в других гаметах). Кроме половой хромосомы, гамета содержит по одной аутосоме из каждой пары аутосом, представленных в соматической клетке. Если особь гетерозиготна, скажем по признаку I, то в соответствующей паре аутосом (находящихся в соматической клетке) будут представлены *разные* аллели гена, отвечающего за признак I — доминантный аллель в одной аутосоме и рецессивный в другой. В гамете находится *только одна аутосома из рассматриваемой пары* — либо с доминантным аллелем гена, либо с рецессивным. Такая же ситуация возможна по отношению к другим генам, отвечающим за признаки II, III и так далее (если, конечно, особь гетерозиготна по всем этим признакам). Все это определяет существование *различных типов гамет* (как для мужских гамет, так и для женских).

При оплодотворении мужская гамета сливается с женской, образуя оплодотворенную женскую гамету, называемую *зиготой*. Как мы выяснили, у мужских и у женских гамет есть разные типы, в которых представлены либо доминантные, либо рецессивные аллели генов, отвечающих за те или иные признаки. Какого именно типа оказалась мужская гамета (*сперматозоид*) и какого типа оказалась женская гамета (*яйцеклетка*) при образовании той или иной зиготы — *это классическая задача из теории вероятностей*. Зигота будет содержать *суммарный* хромосомный набор слившихся гамет; его генная структура окажется той или иной в зависимости от типов гамет, участвовавших в акте оплодотворения. Теперь именно *эта генная структура* является генотипом той особи, которая будет развиваться из данной зиготы посредством многократных клеточных делений.

7.4 СЛУЧАЙНОЕ КОМБИНИРОВАНИЕ ГЕНОВ ПРИ СКРЕЩИВАНИИ

7.4.1. Закон расщепления признаков. Будем рассматривать какой-нибудь один признак. Пусть это будет, как в одном из опытов Менделя, цвет семян гороха. Обсудим результаты этого опыта, используя представления современной цитологии и генетики.

В первом поколении гибридов все особи гетерозиготны по рассматриваемому признаку. В каждой соматической клетке присутствуют оба

аллеля окраски семян — желтый (доминантный) и зеленый (рецессивный). Все семена этих гибридов, естественно, желтые. По рассматриваемому здесь признаку каждый гибрид первого поколения имеет два типа гамет — с доминантным аллелем (A -гаметы) и с рецессивным (a -гаметы). Ясно, что существуют как женские, так и мужские A -гаметы и a -гаметы.

Перейдем к гибридам второго поколения. Каждая новая особь развивается из зиготы, которая образуется при слиянии мужской гаметы типа A или a с женской гаметой типа A или a . Возможны, очевидно, четыре альтернативы (см. рисунок 1 в таблице 10):

$A \cdot A$ — мужская A -гамета соединяется с женской A -гаметой,

$A \cdot a$ — мужская A -гамета соединяется с женской a -гаметой,

$a \cdot A$ — мужская a -гамета соединяется с женской A -гаметой,

$a \cdot a$ — мужская a -гамета соединяется с женской a -гаметой.

Все эти альтернативы равновероятны. Следовательно, среди достаточно большого числа зигот одну четверть будут составлять зиготы типа $A \cdot A$, одну четверть — зиготы типа $A \cdot a$, одну четверть — зиготы типа $a \cdot A$, одну четверть — зиготы типа $a \cdot a$. Впрочем, варианты $A \cdot a$ и $a \cdot A$ как равноправные с точки зрения наследования признака следует рассматривать как один вариант, реализуемый с вероятностью, равной $1/2$.

Если зигота содержит хотя бы один доминантный аллель, то в фенотипе проявится доминантная разновидность признака (желтый цвет семян). Следовательно, растения, развившиеся из зигот типов $A \cdot A$, $A \cdot a$, $a \cdot A$ будут иметь желтые семена, а растения, развившиеся из зигот типа $a \cdot a$, — зеленые. Таким образом, *вероятность появления особи с доминантной разновидностью признака равна $3/4$, а вероятность появления особи с рецессивной разновидностью признака равна $1/4$.* Отсюда как раз и следует полученное Менделем соотношение $3 : 1$, количественно характеризующее расщепление признака при переходе от первого поколения гибридов ко второму. Мы убеждаемся, что *менделевский закон расщепления есть закон вероятностный*. Подчеркнем: та или иная зигота образуется в результате случайной встречи мужской и женской гамет того или иного типа. Большое число подобных случайных встреч с необходимостью выявляет определенную закономерность.

Заметим, что из зигот типа $A \cdot A$ и $a \cdot a$, развиваются *гомозиготные* (по рассматриваемому признаку) особи, тогда как из зигот типа $A \cdot a$ и $a \cdot A$ развиваются *гетерозиготные* особи, у которых расщепление признака при переходе к следующему (третьему) поколению будет происходить опять-таки в соотношении $3 : 1$.

7.4.2 Закон независимого комбинирования (наследования) признаков.

Рассмотрим гибриды второго поколения, учитывая теперь не один какой-нибудь признак, а сразу два признака (*дигибридное скрещивание*). Будем полагать (это существенно), что отвечающие за выбранные признаки гены находятся в разных парах гомологичных аутосом. В качестве примера выберем цвет семян гороха (один признак) и форму семян (другой признак). Условимся обозначать: A — доминантный аллель цвета (желтый цвет), a — рецессивный аллель цвета (зеленый цвет), B — доминантный аллель формы (гладкие семена), b — рецессивный аллель формы (морщинистые семена). Каждый гибрид первого поколения имеет четыре типа мужских и четыре типа женских гамет: AB , Ab , ab , aB . Образование зиготы происходит при слиянии двух гамет (мужской и женской) любого из этих четырех типов.

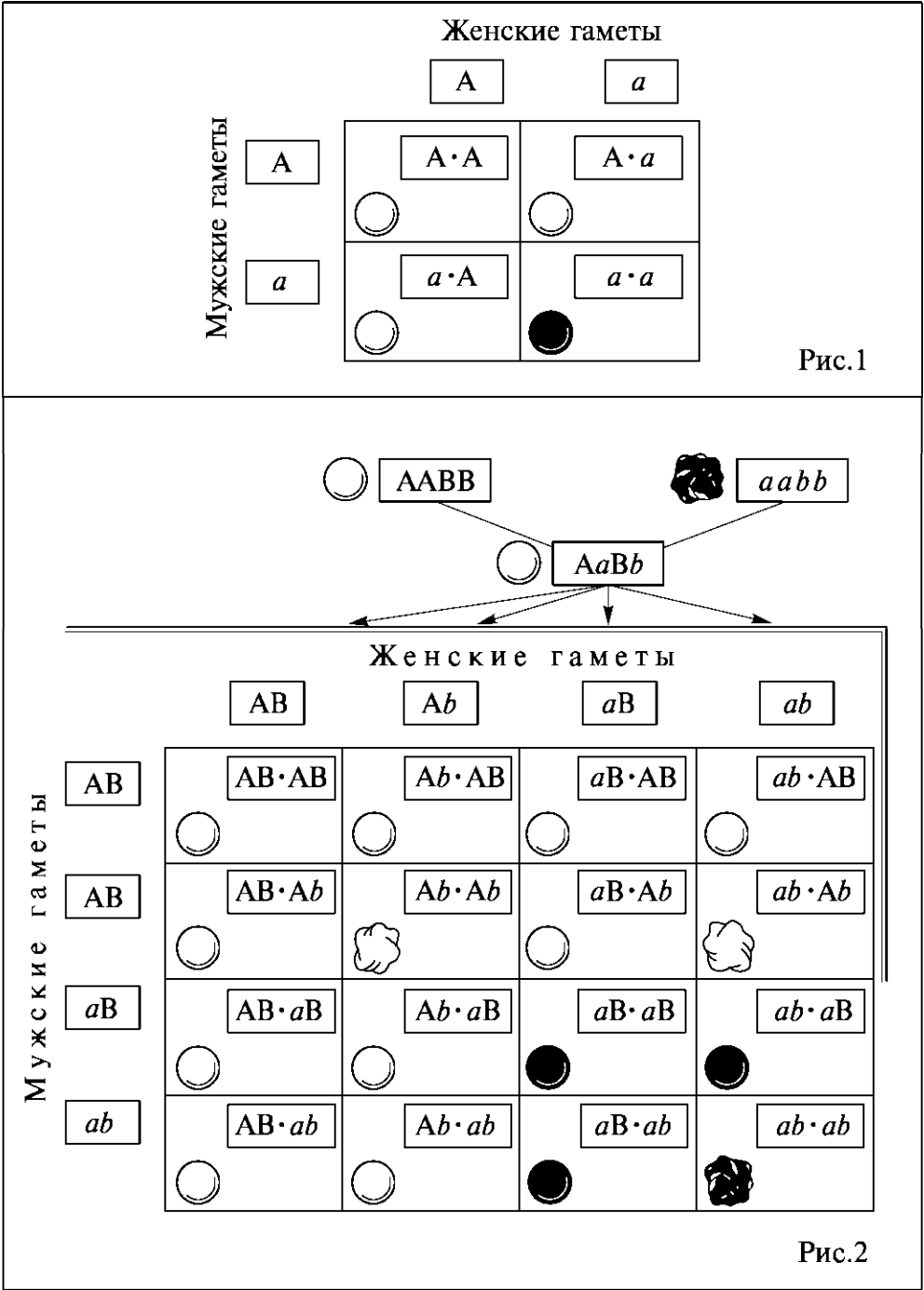
Возможны 16 альтернатив; они представлены на рисунке 2 в таблице 10. Все эти альтернативы равновероятны. Значит, с вероятностью $1/16$ может образоваться при оплодотворении зигота любого из следующих типов:

$AB \cdot AB$	— с женской гаметой AB соединилась мужская гамета AB ;
$AB \cdot Ab$	— с женской гаметой AB соединилась мужская гамета Ab ;
$AB \cdot aB$	— с женской гаметой AB соединилась мужская гамета aB ;
$AB \cdot ab$	— с женской гаметой AB соединилась мужская гамета ab ;
$Ab \cdot AB$	— с женской гаметой Ab соединилась мужская гамета AB ;
$Ab \cdot Ab$	— с женской гаметой Ab соединилась мужская гамета Ab ;
$Ab \cdot aB$	— с женской гаметой Ab соединилась мужская гамета aB ;
$Ab \cdot ab$	— с женской гаметой Ab соединилась мужская гамета ab ;
$aB \cdot AB$	— с женской гаметой aB соединилась мужская гамета AB ;
$aB \cdot Ab$	— с женской гаметой aB соединилась мужская гамета Ab ;
$aB \cdot aB$	— с женской гаметой aB соединилась мужская гамета aB ;
$aB \cdot ab$	— с женской гаметой aB соединилась мужская гамета ab ;
$ab \cdot AB$	— с женской гаметой ab соединилась мужская гамета AB ;
$ab \cdot Ab$	— с женской гаметой ab соединилась мужская гамета Ab ;
$ab \cdot aB$	— с женской гаметой ab соединилась мужская гамета aB ;
$ab \cdot ab$	— с женской гаметой ab соединилась мужская гамета ab ;

Принимая во внимание подавление рецессивных аллелей соответствующими доминантными, заключаем, что

- вероятность появления особей с *желтыми гладкими* семенами есть $P_{жг} = 9 \cdot 1/16 = 9/16$, поскольку равно девяти число типов зигот, в которых одновременно есть и аллель A , и аллель B ;
- вероятность появления особей с *желтыми морщинистыми* семенами есть $P_{жм} = 3 \cdot 1/16 = 3/16$, поскольку равно трем число типов

Таблица 10. Законы расщепления и независимого комбинирования (наследования) признаков



зигот, в которых встречается аллель *A*, но в то же время отсутствует аллель *B*;

- вероятность появления особей с *зелеными гладкими* семенами есть $P_{зг} = 3 \cdot 1/16 = 3/16$ поскольку равно трем число типов зигот, в которых встречается аллель *B*, но в то же время отсутствует аллель *A*;
- вероятность появления особей с *зелеными морщинистыми* семенами есть $P_{зм} = 1/16$, поскольку есть только один тип зиготы, в котором отсутствуют одновременно и аллель *A*, и аллель *B*; это тип *ab·ab*.

Вероятность появления желтых горошин независимо от их формы:

$$P_{ж} = P_{жг} + P_{жм} = 9/16 + 3/16 = 3/4.$$

Вероятность появления зеленых горошин независимо от их формы:

$$P_{з} = P_{зг} + P_{зм} = 3/16 + 1/16 = 1/4.$$

Отсюда следует, что расщепление по признаку цвета происходит в знакомом нам соотношении 3 : 1 независимо от расщепления по признаку формы ($P_{ж}/P_{з} = 3 : 1$).

Вероятность появления гладких горошин независимо от их цвета:

$$P_{г} = P_{жг} + P_{зг} = 9/16 + 3/16 = 3/4.$$

Вероятность появления морщинистых горошин независимо от их цвета:

$$P_{м} = P_{жм} + P_{зм} = 3/16 + 1/16 = 1/4.$$

Отсюда следует, что расщепление по признаку формы происходит в соотношении 3 : 1 независимо от расщепления по признаку цвета. Таким образом, *расщепление по одному признаку идет независимо от расщепления по другому признаку* — в соответствии с менделевским законом *независимого расщепления признаков*, который обычно называют *законом независимого комбинирования (наследования) признаков*.

7.5 СЦЕПЛЕННОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ И ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕКРЕСТА ХРОМОСОМ

Закон независимого расщепления признаков справедлив, если рассматриваемые гены входят в разные хромосомы в гамете (и соответственно в разные пары гомологичных хромосом в соматической клетке). Если же гены попадают в *одну и ту же* хромосому (как схематически показано на рисунке 1 в таблице 11), то они должны наследоваться

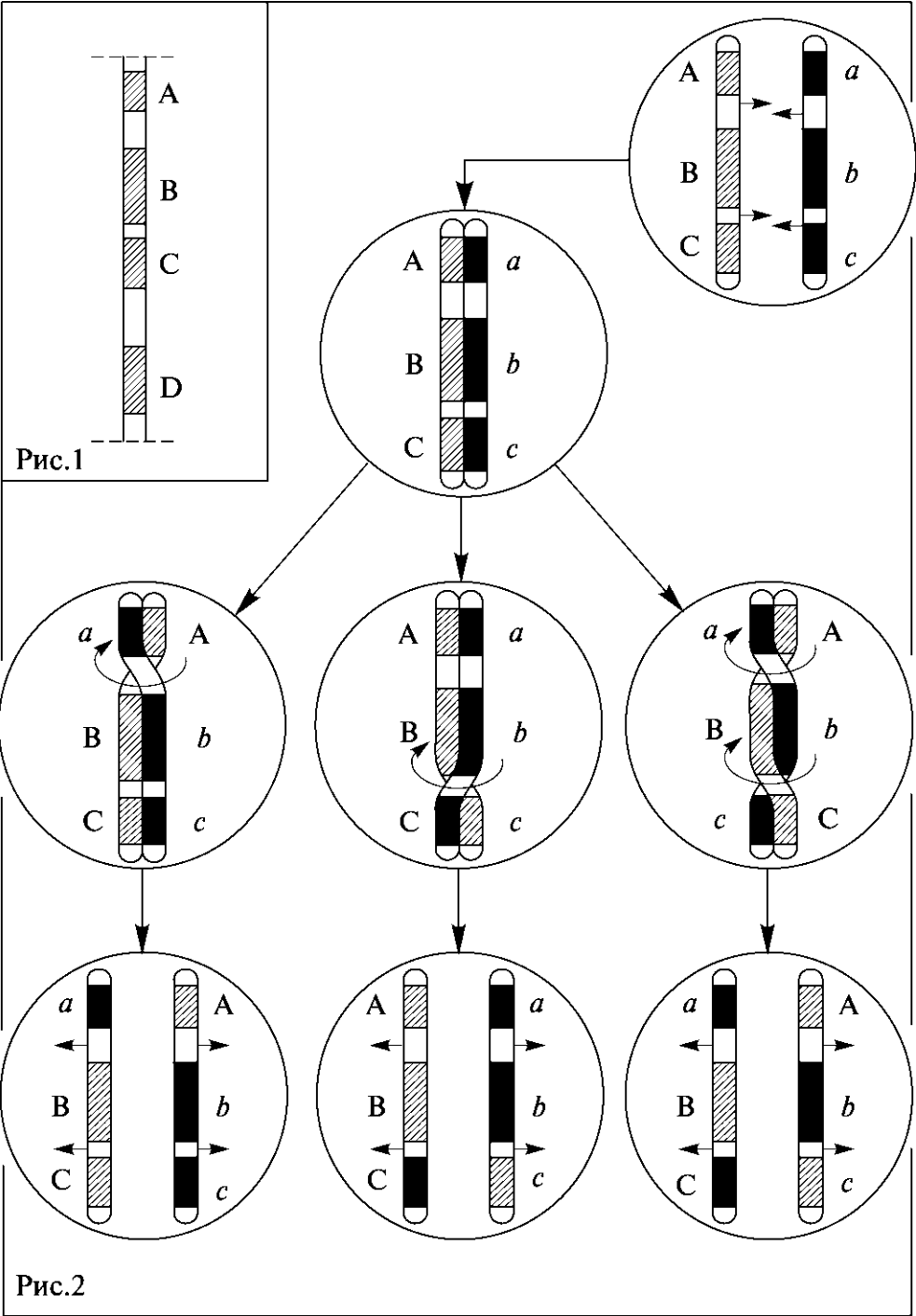
вместе. В этом случае говорят о *сцепленном наследовании*. С ним связано открытое и исследованное известным американским биологом, одним из основоположников генетики *Томасом Хантом Морганом* (1866–1945) отклонение от менделевского закона независимого расщепления признаков, наблюдаемое всякий раз, когда рассматриваемые признаки определяются генами, входящими в одну и ту же хромосому (сцепленными генами). Наряду с открытием сцепленного наследования, Морган получил ряд новых важных результатов. Познакомимся с открытым Морганом *явлением перекреста хромосом* (так называемым *кроссинговером*).

Исследуя передачу по наследству признаков, определяемых сцепленными генами, Морган обнаружил, что сцепление *не является абсолютным*: среди гибридов второго поколения наблюдаются особи, у которых часть сцепленных генов унаследована от одного родителя, а остальные — от другого. Выполнив исследования на дрозофиле, Морган нашел объяснение этому факту. Он обнаружил, что процесс образования половых клеток в организме (этот процесс называют *мейозом*) начинается со своеобразного «прощального танца» гомологичных хромосом.

Представьте себе две вытянувшиеся гомологичные хромосомные нити, которые, перед тем как разойтись в разные гаметы, тесно прильнули друг к другу (каждый ген к соответствующему гену) и затем несколько раз закрутились вокруг самих себя. Это закручивание хромосом, или, иначе взаимный перекрест, приводит к тому, что внутриклеточные силы, призванные разъединить хромосомы, оттащить их друг от друга, *разрывают хромосомы*. Место разрыва случайным образом меняется от одной пары перекрещенных хромосом к другой. В результате разрыва в одну гамету отправляется не целая хромосома, а *взаимно дополняющие друг друга* части обеих гомологичных хромосом; другие части этих хромосом отправляются в другую гамету. Подобный процесс (в нескольких вариантах) показан схематически на рисунке 2 в таблице 11.

Подчеркнем, что в момент разрыва соответствующие гены обеих хромосом (речь идет об аллелях) непосредственно контактируют друг с другом. Поэтому, где бы ни произошел разрыв, аллель из одной хромосомы отправится в одну гамету, а аллель из другой хромосомы — в другую гамету. Одним словом, не получится так, чтобы в какой-то гамете не оказалось ни одного аллеля рассматриваемого гена. Все это можно представить так, как если бы «танцующие» пары хромосом перед расставанием обменялись друг с другом какими-то частями, причем обязательно соответствующими частями. В конечном счете, в каждой образовавшейся

Таблица 11. Сцепленное наследование и явление перекреста хромосом



гамете все равно окажется полный набор типов генов, присущий данной хромосоме. При этом произойдет случайное перекомбинирование отцовских и материнских аллелей.

В явлении перекреста хромосом *существенную роль играет случай*. Случайно место разрыва в той или иной паре хромосом. Случайно число разрывов в данной паре хромосом (может произойти один разрыв, но могут произойти два, три и более разрывов). Случайна перекомбинация родительских аллелей. Увеличивая поле действия случайного, явление перекреста хромосом *способствует внутривидовому развитию*, создавая дополнительные возможности перетасовки родительских генов.

В то же время это явление как бы *оберегает вид* от возможных случайных генетических «посягательств» на него. Допустим, что произошло случайное скрещивание особей двух *разных* видов, и появились гибриды. У этих гибридов в каждой «гомологичной паре» будут объединены хромосомы, весьма отличающиеся одна от другой по своей генной структуре (ведь эти хромосомы взяты от родителей, относящихся к разным видам!). Когда наступит время формирования половых клеток, такие хромосомы не смогут вследствие существенных взаимных различий исполнить совместный «прощальный танец». В результате не смогут образоваться гаметы, а следовательно, и не появятся гибриды второго поколения. Вот почему мулы (гибрид лошади и осла) не имеют потомства.

7.6 СТАТИСТИЧЕСКИЙ ХАРАКТЕР ЗАКОНОВ КЛАССИЧЕСКОЙ ГЕНЕТИКИ

В работах Грегора Менделя и его последователей установлен ряд принципиальных свойств генетического материала. Отметим в этой связи:

- материальность носителей наследственных признаков;
- дискретность генетического материала (реализованную впоследствии в понятии гена как участка молекулы ДНК);
- линейное расположение генов;
- понятия доминантности и рецессивности;
- комбинирование генов случайным образом;
- закономерности расщепления признаков в потомстве гибридов.

Хорошая математическая подготовка, полученная Менделем в юности в Венском университете, помогла ему систематизировать собствен-

ные исследования, математически проанализировать проявления тех или иных признаков в различных поколениях гибридов, подойти вплотную к раскрытию вероятностной природы наследования.

Говоря о *вероятностной природе* законов классической генетики, отметим четыре момента.

Первый момент: случайное сочетание несцепленных генов при образовании гамет. Гетерозиготный организм Aa дает только два типа гамет (A и a), появление которых равновероятно; каждый тип появляется с вероятностью $1/2$. Дигетерозиготный организм $AaBb$ при свободном комбинировании генов дает четыре типа гамет (AB, Ab, aB, ab), каждый из которых появляется с вероятностью $1/4$. Если рассматривать образование гамет при генотипе с тремя гетерозиготными аллельными парами ($AaBbCc$), то число типов гамет достигнет восьми ($ABC, ABc, AbC, aBC, abC, aBc, Abc, abc$) с вероятностью появления каждого, равной $1/8$. В общем случае, если n — количество гетерозиготных аллельных пар, то число различных равновероятных типов гамет равно 2^n .

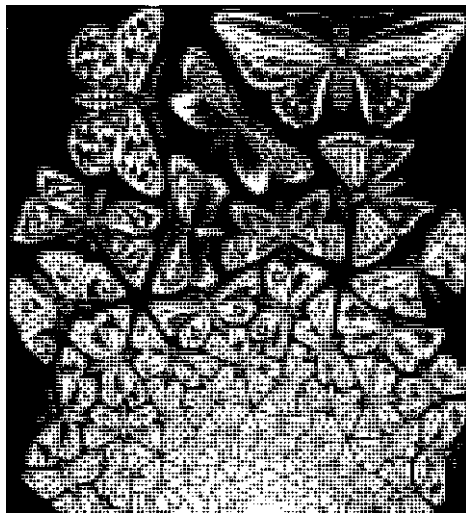
Второй момент: случайное сочетание мужских и женских гамет при образовании зиготы. При скрещивании гетерозиготных организмов число возможных комбинаций генотипов при образовании зиготы равно 4^n , где n — число гетерозиготных аллельных пар исходных организмов.

Случайное комбинирование гамет при их объединении в зиготу лежит в основе одной и наиболее общих биологических закономерностей, являющейся *принципиально вероятностной закономерностью*, поскольку она связана с объективной случайностью (а отнюдь не с неполнотой наших знаний).

Третий момент: случайность актов перекреста хромосом при сцепленном наследовании. По частоте наблюдаемых при перекрестах перекombинациях аллелей тех или иных генов судят о вероятности соответствующих событий, а это в свою очередь дает возможность оценивать длину расстояния между определенными генами хромосомной нити. Чем меньше расстояние между генами, чем ближе они расположены в хромосоме друг к другу, тем сильнее они сцеплены и тем реже разрываются при перекресте. На основании изучения перекреста хромосом составляют генетические карты, представляющие собой схему взаимного расположения генов в хромосоме.

Четвертый момент: статистическая устойчивость результатов скрещивания. Как показывает практика, соотношение фенотипов потомков, ожидаемых в любом окрашивании, выполняется тем точнее, чем больше потомков.

В заключение заметим, что бурное развитие в XX столетии генетической науки привело к возникновению в ней ряда самостоятельных направлений: *популяционной генетики, генетики человека, генной инженерии* и др. Во всех без исключения научных направлениях на первый план выдвинулись вероятностные закономерности, демонстрируя тем самым свою фундаментальность и подтверждая общее правило: чем глубже мы проникаем в картину природных явлений, тем более значительную роль начинают играть вероятностные представления и вероятностные подходы. Важно иметь в виду, что генетические процессы рассматриваются *на уровне микропроцессов* и потому органически сочетаются с законами *квантовой физики*.



КВАНТОВАЯ ФИЗИКА: РОЖДЕНИЕ И СТАНОВЛЕНИЕ

...Физикам был преподан урок, указывающий на ту осторожность, с какой надо применять все обычные представления всякий раз, как мы имеем дело не с повседневным опытом... При изучении атомных явлений мы неоднократно научались тому, что вопросы, на которые, как считалось, давно получены окончательные ответы, таят в себе подчас неожиданные для нас сюрпризы.

Нильс Хендрик Давид Бор

Любая из новых революционных идей в современной науке возникла как усовершенствование старой системы мышления, ее обобщение и расширение. Теория относительности не устраняет механику Ньютона — орбиты спутников все еще рассчитываются по ньютоновской теории, — она расширяет область применения механики на случай высоких скоростей и устанавливает общую значимость одних и тех же концепций для механики и теории

электричества. Появление квантовой теории, видимо, больше других событий в науке напоминает революцию, но даже эти идеи, например соотношения неопределенностей, следует рассматривать как уточнение классической механики при переходе к рассмотрению очень малых систем; они не меняют степени приложимости классической механики к движению более крупных тел.

Виктор Фредерик Вайскопф

...Потребовалось более четверти века на то, чтобы продвинуться от гипотезы Планка о существовании кванта действия до действительного понимания законов квантовой теории.

Вернер Гейзенберг

8.1 БЕСЕДА О ТОМ, ЧТО СЛЕДУЕТ ПОНИМАТЬ ПОД КВАНТОВОЙ ФИЗИКОЙ

Автор. Впитав в себя идеи теории относительности (невозможность передачи сигналов со скоростью больше скорости света в вакууме, взаимосвязь массы и энергии, инвариантность физических законов относительно перехода из одной инерциальной системы в другую и т. п.), физика XX столетия развивалась далее под флагом *квантовой теории*. В определенном смысле практически вся современная физика — это *квантовая физика*. Ее рождение и развитие может рассматриваться как основной итог «новейшей революции в естествознании». *Здесь произошло подлинное объединение диалектики и естествознания. Квантовая физика произвела переоценку роли динамических и статистических закономерностей в пользу примата последних, потребовала изменения самого характера физических моделей, переосмысления роли исследователя в изучаемом им мире, отказа от многих привычных представлений и понятий.*

Читатель. Что же такое квантовая физика? Как можно ответить на этот вопрос? Я полагаю, что под квантовой физикой следует понимать науку о свойствах материи на уровне *микроявлений*. Она исследует законы движения *микрообъектов*. Основные «действующие лица» в квантовой физике — это *атомы, молекулы, элементарные частицы*.

Автор. Это правда, но это — не вся правда. На поставленный вопрос нельзя ответить однозначно. Квантовая физика — это также (может быть, в первую очередь) *теоретическая основа современного учения о структуре и свойствах вещества и поля*. По сравнению с классической физикой *она рассматривает материю на более глубоком, более фундаментальном уровне*.

Читатель. Что означает «на более фундаментальном уровне»?

Автор. Она позволяет раскрыть многие «почему?», которые оставались без ответа в классической физике. Почему, например, алмаз тверд? Почему электрическая проводимость полупроводника растет с увеличением температуры? Почему магнит утрачивает свои магнитные свойства с нагреванием? На эти и многие другие подобные вопросы классическая физика ответа не дает — здесь надо обращаться к квантовой теории. Многие параметры вещества (например, вязкость, удельную теплоемкость, теплопроводность, диэлектрическую проницаемость, электрическую проводимость, показатель преломления) классическая физика рассматривает как параметры *эмпирические*, их значения для различных материалов определяются на основе *эксперимента*. Квантовая физика дает возможность рассчитать физические параметры вещества. Отвечая на вопрос «что такое квантовая физика?», известный американский физик *Уиллис Юджин Лэмб* (род. 1913 г.) заметил, что проще всего определить ее как «науку, обеспечивающую нас удивительным набором правил расчета определенных физических свойств вещества».

Читатель. Но так ли уж важно иметь возможность выполнить расчет, если можно взять да просто измерить тот или иной параметр вещества?

Автор. Теоретические расчеты параметров не только *объясняют* их изменения в тех или иных условиях, но, что еще более важно, открывают путь к *созданию материалов с наперед заданными свойствами*.

Читатель. Интересно, в каком отношении к классической физике находится квантовая физика?

Автор. Прежде всего отметим, что квантовая физика включает в себя классическую как *предельный случай*, соответствующий переходу от *микрообъектов* к обычным объектам (будем называть их *макрообъектами*). При таком переходе законы квантовой физики превращаются, вообще говоря, в законы классической физики.

Читатель. Как я понимаю, у квантовой и классической физики разные «сферы действия». Квантовая физика работает в микромире, а классическая в макромире.

Автор. Я бы не стал говорить о переходе от квантовой физики к классической как о переходе из одного «мира» в другой. Строго говоря,

нет ни «микромира», ни «макромира», существующих по отдельности. Есть мир, который нас окружает и частью которого мы сами являемся. Ограничиваясь изучением только макрообъектов в реально существующем мире, мы тем самым демонстрируем *менее глубокий*, более поверхностный подход к рассмотрению явлений этого мира. Переходя же к изучению микрообъектов, мы тем самым пытаемся познать реальный мир и, в частности, те же микрообъекты, *на более глубоком уровне*, с учетом подробностей и тонкостей, которые ранее во внимание не принимались.

Читатель. Понятно. Одни и те же микрообъекты можно изучать на разных уровнях. Можно изучать, не интересуясь микрообъектами, из которых состоят макрообъекты. Но можно изучать, вникая во внутреннюю структуру макрообъектов, рассматривая свойства тех «кирпичиков», из которых они построены.

Автор. Кроме того, следует помнить, что *грань между микро- и макроявлениями в общем случае достаточно условна и подвижна*. Классические представления нередко оказываются полезными при рассмотрении микроявлений и микрообъектов, а квантовомеханические представления могут оказаться существенными в макроявлениях. Существует же специальный термин — *квантовая макрофизика*. Он применяется, в частности, в квантовой электронике, при изучении явлений сверхтекучести и сверхпроводимости и в ряде других случаев.

Читатель. Я знаю, что квантовая теория начала развиваться как *квантовая механика*...

Автор. Ее поначалу называли «*волновой механикой*». Термин «квантовая механика» появился позднее, в конце 20-х годов XX столетия.

Читатель. По-видимому, квантовая физика — это та же квантовая механика, понимаемая более широко?

Автор. Строго говоря, *квантовая физика — это не одна, а ряд наук*. Науки эти вполне самостоятельны, хотя, следует подчеркнуть, границы между ними часто оказываются весьма неопределенными. Фундаментом квантовой физики является *квантовая механика* (в прошлом волновая механика), изучающая законы движения (законы механики) микрообъектов, строение и свойства атомов и молекул. К ней тесно примыкают *квантовая электродинамика* (она изучает взаимодействие электронов и фотонов) и относительно недавно возникшая *квантовая хромодинамика* (она изучает кварковую структуру элементарных частиц). Как от ствола дерева, от квантовой механики пошли многие «ветви», каждая из которых является сегодня вполне самостоятельной наукой: *квантовая хи-*

мια, квантовая теория твердого тела, квантовая электроника, теория атомного ядра, теория слабых взаимодействий и др. Обширный конгломерат наук, объединяемый общим термином «квантовая физика», служит теоретической базой для многих современных научно-технических направлений (так называемых прикладных наук) — таких, например, как *материаловедение* (включая синтез материалов с наперед заданными свойствами), *электроника* (включая вычислительную технику и робототехнику), *атомная энергетика*, *лазерная техника*.

Читателям. Неужели, говоря в данной и следующей темах о квантовой физике, мы в той или иной мере коснемся всех перечисленных здесь наук и научно-технических направлений?

Автор. В данной и следующей темах мы ограничимся рассмотрением *истоков, первых шагов, основных идей и принципов* квантовой физики, т. е. останемся в пределах *квантовой механики*. В теме 10 мы познакомимся с элементами физики твердого тела (включая физику транзистора), физикой лазера и физикой атомного реактора. Темы 11 и 12 будут посвящены атомным ядрам, элементарным частицам, кваркам. В общем плане темы 10–12 также относятся к квантовой физике.

8.2 ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

8.2.1. Введение Планком кванта действия. В § 5.5 мы уже упоминали о *тепловом излучении*. Теперь настало время поговорить о нем немного подробнее. Тепловое излучение интересно тем, что оно может быть *равновесным*, т. е. возможно термодинамическое равновесие между телом и электромагнитным излучением, которое оно испускает. Равновесное тепловое излучение можно получить внутри полости тела, поддерживаемого при некоторой постоянной температуре. При равновесии энергия электромагнитного излучения, *испускаемого* телом внутрь полости в единицу времени, равна энергии излучения, *поглощаемого* стенками полости за это же время. Из термодинамики следовало, что классические вибраторы Герца (если ими воспользоваться для представления находящихся в теле излучателей) будут наполнять полость излучением в равной мере *во всем интервале частот от нуля до бесконечности*, и следовательно, энергия теплового излучения, содержащаяся внутри полости любого объема, должна быть *бесконечной*. Этот вывод, получивший название «ультрафиолетовой катастрофы», представлялся, естественно, абсурдным.

Решение проблемы нашел *Макс Планк*, выдвинув в 1900 году гипотезу, согласно которой энергия испускаемого вибраторами излучения *квантуется*, т. е. принимает дискретные значения:

$$E_n = h\nu n \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

где ν — частота излучения, а h — некоторая универсальная физическая постоянная, имеющая размерность физической величины, называемой *действием*. Эта «безумная» для того времени гипотеза спасала от «ультрафиолетовой катастрофы» и приводила к зависимости плотности энергии теплового излучения от частоты, которая хорошо согласовывалась с экспериментально установленной зависимостью, если принять, что

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}.$$

В упомянутой зависимости большие частоты вносили в плотность энергии излучения вклад, тем меньший, чем больше была частота, а потому бесконечной энергии уже не получалось.

Так в науке появился *квант действия* h , названный впоследствии *постоянной Планка*. В определенном смысле именно с появления h и зародилась квантовая физика. Поэтому 1900-й год принято считать годом ее рождения.

Вспоминая об этом времени, Макс Планк сказал в 1920 году в своей Нобелевской лекции:

«... Или квант действия был фиктивной величиной — тогда весь вывод закона излучения был принципиально иллюзорным и представлял собой просто лишенную содержания игру в формулы, или же при выводе этого закона в основу была положена правильная физическая мысль — тогда квант действия должен был играть в физике фундаментальную роль, тогда появление его возмещало нечто совершенно новое, дотоле неслышанное, что, казалось, требовало преобразования самих основ нашего физического мышления, покоившегося со времен обоснования анализа бесконечно малых Ньютоном и Лейбницем на предположении о *непрерывности* всех причинных связей».

Время полностью подтвердило глубину физической интуиции Макса Планка.

8.2.2. Световые кванты Эйнштейна и эффект Комптона. Планк в 1900 году полагал, что излучение прерывисто лишь испускается, а *поглощается непрерывно*. Эйнштейн пошел дальше и распространил идею прерывистости также и на поглощение излучения. Он предположил, что *квантуется энергия не только испускаемого телом излучения, но также излучения, поглощаемого телом*. Это позволило ему объяснить в 1905 году проблемы, возникшие в связи с исследованиями *фотоэффек-*

та: существование красной границы фотоэффекта и зависимость энергии фотоэлектрона не от интенсивности света, а от его частоты. По Эйнштейну, *электроны вещества поглощают энергию света порциями $h\nu$* . Энергия $E_{\text{ф}}$ фотоэлектрона, поглотившего порцию энергии $h\nu$, должна описываться простой формулой:

$$E_{\text{ф}} = h\nu - A, \quad (2)$$

где A — наименьшая для данного вещества энергия, которую должен иметь электрон, чтобы покинуть вещество (так называемая работа выхода для данного вещества).

Если энергия излучения и испускается, и поглощается порциями, то естественно, казалось бы, предположить, что *само излучение* имеет дискретную структуру. Но как тогда быть со *световыми волнами*? Недаром прошло более десяти лет, прежде чем Эйнштейн решился сформулировать идею «световых квантов», названных позднее фотонами. В 1916 году он предложил связывать со световым квантом, имеющим частоту ν , энергию E и импульс p :

$$E = h\nu, \quad p = h\nu/c. \quad (3)$$

Эти выражения для энергии и импульса светового кванта полностью согласуются, как легко видеть, с полученным из специальной теории относительности соотношением (20) из § 6.5, в котором теперь знак приближенного равенства $\approx$ можно заменить обычным знаком равенства $=$, поскольку скорость светового кванта как раз и есть скорость света. В работе «К квантовой теории излучения» (1916) Эйнштейн писал:

«Если пучок световых лучей воздействует на встретившуюся ему молекулу так, что она посредством элементарного процесса получает или отдает в форме излучения некоторое количество энергии $h\nu$, то молекула всегда будет получать и импульс $h\nu/c$ в направлении движения пучка при поглощении энергии и в противоположном направлении при испускании энергии... Если молекула теряет энергию без внешнего инициирования (спонтанное испускание), то этот процесс также является *направленным*. Спонтанного излучения в виде сферических волн в элементарном процессе не существует. В элементарном процессе спонтанного испускания молекула получает импульс отдачи, величина которого равна $h\nu/c$, а направление определяется, согласно современному состоянию теории, лишь «случайностью»».

Прямое экспериментальное подтверждение существования световых квантов с энергией и импульсом, описываемыми выражениями (3), было получено в 1923 году в опытах известного американского физика *Артура Холли Комптона* (1892–1962) по рассеянию электромагнитных лучей

рентгеновского диапазона частот на электронах. В этих опытах наблюдалось увеличение длины волны рассеянного излучения по сравнению с длиной падающего (ныне это называют *эффектом Комптона*). Согласно классической теории электромагнитного поля такой эффект был невозможен. Падающая волна частоты ν должна вызывать колебания электронов с той же частотой. И с той же частотой ν должны излучаться вторичные волны; это и есть рассеянное излучение. Объяснить наблюдаемый Комптоном *эффект изменения длины волны при рассеянии* оказалось возможным, если только представить световые кванты в виде частиц, обладающих энергией $h\nu$ и импульсом $h\nu/c$ и воспользоваться законами сохранения энергии и импульса при столкновении светового кванта с электроном. Сталкиваясь с электроном, световой квант передает ему часть своей энергии, в результате энергия светового кванта и, значит, его частота уменьшается (а длина волны увеличивается).

Немецкий физик *Вальтер Боте* (1891–1957) разработал метод совпадений и, используя его, поставил в 1926 году опыт, в котором регистрировались два рентгеновских пучка, рассеянных в разные стороны от фольги-мишени (с помощью двух газоразрядных счетчиков). Падающий рентгеновский пучок имел достаточно малую интенсивность, позволившую наблюдать *раздельные во времени* акты рассеяния в разные счетчики. Было ясно, что излучение испускается фольгой не в виде волн, а в виде световых квантов, которые вылетают то в одну, то в другую сторону и регистрируются то одним, то другим счетчиком. С этого времени световые кванты были признаны настоящими частицами и получили название *фотонов*.

Таким образом, понадобилась четверть века для того, чтобы идея Планка получила логическое завершение. Один из создателей квантовой механики, известный немецкий физик *Вернер Гейзенберг* (1901–1976) вспоминал: «Квантовая теория Планка была в ту эпоху, собственно, вовсе не теорией, а занозой в ученых умах. В плотно сбитое строение классической физики она внесла идеи, во многих отношениях чреватые трудностями и противоречиями».

8.2.3. Линейчатые спектры газов и комбинационный принцип Ритца. Рождение квантовой физики было связано не только с исследованиями по тепловому излучению, фотоэффекту и эффекту Комптона. Большую роль сыграли также исследования, проводившиеся в двух других областях — по *спектроскопии газов* и по *изучению строения атома*. Еще в конце XIX века были обнаружены упорядоченные наборы линий в линейчатых спектрах различных газов и паров (напомним пункт 5.4.1).

Оказалось, что каждый химический элемент характеризуется *собственным набором спектральных линий*. Этот набор распадается на несколько серий. В 1885 году швейцарский физик *Рудольф Бальмер* (1825–1898) экспериментально установил формулу, выражающую частоту спектральных линий атомарного водорода:

$$\nu_{sn} = cR \left(\frac{1}{s^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (4)$$

Здесь ν_{sn} — дискретные частоты спектра, c — скорость света в вакууме, R — постоянная, называемая ныне постоянной Ридберга (по имени известного шведского физика *Юханнеса Роберта Ридберга* (1854–1919), занимавшегося систематикой атомных спектров; $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$). Входящие в (4) s и n — это натуральные числа. Число s фиксирует ту или иную серию, а n фиксирует линию в серии; для каждой серии $n > s$. При $s = 1$ получаем так называемую серию Лаймана, при $s = 2$ — серию Бальмера (она попадает в область видимого спектра), при $s = 3$ — серию Пашена и т. д.

Изучив закономерности в линейчатых спектрах различных газов, известный немецкий физик и математик *Вальтер Ритц* (1878–1909) сформулировал в 1908 году *комбинационный принцип*, согласно которому всякую новую линию в спектре данного элемента можно вывести из ранее известных, комбинируя их в виде сумм и разностей.

Довольно богатый экспериментальный материал по атомным спектрам, накопленный к началу XX столетия, не находил объяснения в рамках классической физики. Почему спектры свободных атомов линейчатые? Чем объясняются наблюдаемые закономерности в спектральных линиях? Как объяснить комбинационный принцип Ритца? Не был известен физический механизм испускания света атомом. Было неясно, в частности, что именно испускает отдельный атом: *сразу все* линии в спектре данного элемента или *только одну* линию из спектра.

По классической электродинамике испускание излучения атомом должно происходить вследствие колебательных движений электронов атома. На первый взгляд, планетарная модель атома по Резерфорду не противоречила представлению о колеблющемся электроне. Ведь движение электрона по окружности вокруг ядра атома можно рассматривать как суперпозицию колебаний, происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях. Беда, однако, в том, что электрон движется по круговой орбите *все время* и, значит, атом должен, *не переставая*, испускать излучение. Такой атом долго существовать не

может. Непрерывно теряя энергию на излучение, электрон будет по спирали приближаться к ядру и, в конце концов, упадет на него. При этом за время своего короткого существования атом должен был бы испускать излучение с непрерывно изменяющейся частотой и его спектр испускания должен был бы быть не линейчатым, а *сплошным*. Сплошные неувязки!

8.3 ТЕОРИЯ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

Великий физик XX столетия датчанин *Нильс Хендрик Давид Бор* (1885–1962) усмотрел глубокую связь между линейчатой структурой атомных спектров и идеями Планка и Эйнштейна о дискретном характере процессов испускания и поглощения света атомами. Исходя из планетарной модели, он в своей знаменитой работе «О строении атомов и молекул» (1913) развил *теорию атома водорода*.

Напомним вытекающие из этой теории основные формулы. Электрон в атоме водорода может находиться, по Бору, лишь на *определенных* орбитах, имеющих радиус

$$r_n = h^2 n^2 / (4\pi^2 m e^2) \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

(m и e — масса и заряд электрона). Скорость электрона на n -й орбите

$$v_n = 2\pi e^2 / (h n), \quad (6)$$

а полная (кинетическая плюс потенциальная) энергия

$$E_n = -2\pi^2 m e^4 / (h^2 n^2). \quad (7)$$

Отрицательность энергии означает, что электрон находится в связанном состоянии (за нуль принимается энергия свободного электрона). Как легко усмотреть, E_n и r_n связаны соотношением

$$E_n = -e^2 / 2r_n. \quad (8)$$

На рисунке 1 в таблице 12 показаны определяемые по формуле (5) электронные орбиты для нескольких первых значений *квантового числа* n , а на рисунке 2 представлены энергетические уровни, определяемые формулой (7). На рисунке 3 изображена зависимость $E = -e^2 / (2r)$, наглядно демонстрирующая связь между (5) и (7).

Эти результаты Нильс Бор получил, используя, во-первых, *второй закон Ньютона* для заряда, движущегося по окружности под действием кулоновской силы притяжения:

$$mv_n^2/r_n = e^2/r_n^2 \quad (9)$$

и, во-вторых, условие квантования момента импульса электрона

$$mv_nr_n = h\nu/2\pi. \quad (10)$$

Последнее условие Бор ввел в свою теорию, исходя из идеи Планка о том, что возможны лишь те состояния осциллятора (вибратора), энергия которых равна $h\nu n$ (напомним соотношение (1)), и обобщив сформулированное для осциллятора правило квантования на другие механические модели — в частности, на тело, движущееся по круговой орбите.

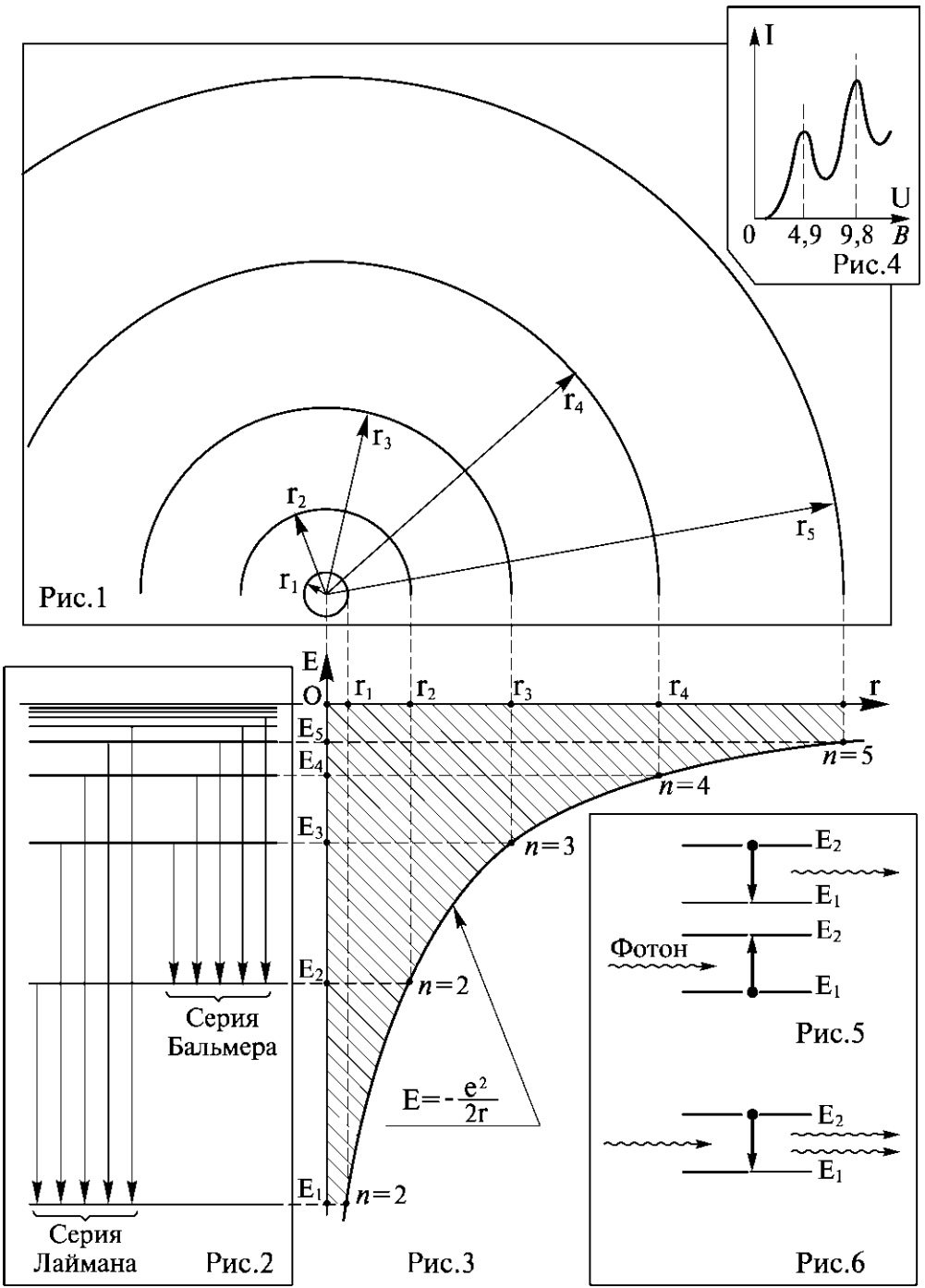
В основе теории Бора лежат два постулата. *Первый постулат* вводит понятие «дозволенная орбита». Это есть орбита, находясь на которой электрон, вопреки требованиям классической электродинамики, не излучает. Таким орбитам отвечают *стационарные состояния атома* и определенные уровни его энергии E_n . *Второй постулат* утверждает, что испускание или поглощение света происходит *при переходе электрона с одной дозволенной орбиты на другую*. Иными словами, *при переходе атома с одного энергетического уровня на другой* (из одного стационарного состояния в другое). Эти переходы называют *квантовыми переходами*. При каждом таком переходе испускается (поглощается) один фотон; его энергия $h\nu$ равна *разности энергий* соответствующих энергетических уровней атома. Если, например, происходит квантовый переход с уровня E_n на уровень $E_{n'}$ (пусть $E_n > E_{n'}$), то испускается фотон с энергией

$$\boxed{h\nu = E_n - E_{n'}}. \quad (11)$$

Соотношение (11) известно как *правило частот Бора*. Оно представляет собой «сердцевину» теории Бора. Во-первых, из него следовало, что частота испускаемого атомом излучения не зависит от частоты обращения электрона по орбите вокруг ядра атома (иными словами, не зависит от частоты колебаний, которые соответствуют движению по орбите), а определяется просто разностью энергий соответствующих уровней. Известно восклицание Эйнштейна, познакомившегося с работой Бора: «Но в таком случае частота света совершенно не зависит от частоты электрона! Это же колоссальное открытие!»

Во-вторых, правило частот ярко демонстрирует *дискретность* процессов испускания и поглощения излучения атомом. Вместо непрерывного,

Таблица 12. Теория атома водорода по Бору и взаимодействие атомов с излучением по Эйнштейну



требующего какого-то времени процесса испускания или поглощения электромагнитной волны происходит *мгновенный акт рождения или уничтожения фотона*. При этом состояние атома *скачкообразно* меняется. В зависимости от того, между какой парой уровней данного атома совершился квантовый переход, происходит рождение (уничтожение) фотона, вносящего вклад в соответствующую линию спектра испускания (поглощения).

В-третьих, правило частот объяснило не только линейчатый характер атомных спектров, но и наблюдаемые *закономерности* в структуре этих спектров. Рассмотрим спектр атомарного водорода. Подставляя (7) в (11), получаем:

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{(n')^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (12)$$

В результате приходим к закономерности (4) и одновременно находим выражение, позволяющее *вычислить* постоянную Ридберга:

$$R = 2\pi^2 m e^4 / (h^3 c). \quad (13)$$

Вычисленное по этой формуле значение постоянной Ридберга R прекрасно согласовывалось с измеренным значением.

На рисунке 2 в таблице 12 стрелками показаны квантовые переходы в атоме водорода, соответствующие спектральным сериям Лаймана и Бальмера.

Теорию Бора рассматривают как один из *первых этапов* в развитии квантовой физики и при этом отмечают ее *непоследовательность*, проявляющуюся в том, что здесь наряду с условием квантования (10) используется также классическое соотношение (9). Указанная непоследовательность теории связана с присутствием в модели электронных орбит. Обратим внимание на то, что орбиты, по сути дела, не согласуются с существованием дискретных дозволённых значений энергии электрона в атоме. В этом легко убедиться, поставив вопрос: чему равна энергия электрона в тот, пусть и весьма короткий (почти мгновенный), но все-таки конечный промежуток времени, когда с исходной орбиты электрон уже «ушел», а на конечную орбиту еще не прибыл? Ведь не может же он мгновенно преодолеть расстояние между орбитами! Отметим, что в последовательной квантовой теории *электронных орбит в атоме попросту нет*. К сожалению, архаизм оказался живучим — по сей день электронные орбиты «украшают» страницы многих книг, журналов, витрин магазинов, и большинство наших современников всерьез воспринимают эти изображения.

И все же теория Бора представляет интерес не только в историческом плане. Есть в ней непреходящие ценности. Недаром она позволила вычислить постоянную Ридберга. Главная ценность теории Бора — в правиле частот (11). Электронных орбит нет, но есть стационарные состояния атома и соответствующие им энергетические уровни атома. Не выдержал испытания временем рисунок 1 в таблице 12, но сохранил значение рисунок 2.

Существование энергетических уровней атома убедительно доказали выполненные в 1913 году опыты немецких физиков *Джеймса Франка* (1882–1964) и *Густава Герца* (1887–1975) (не надо путать с *Генрихом Герцем*, доказавшим экспериментально существование электромагнитных волн!). Для обнаружения стационарных состояний атомов Франк и Герц использовали установку с газоразрядной трубкой, в которой измерялась энергия бомбардирующих мишень (атомы паров ртути) электронов по мере изменения их кинетической энергии. Плавное изменение энергии электронов производилось за счет изменения ускоряющего потенциала U , подаваемого на катод трубки, содержащей пары ртути при низком давлении. Измерение энергии электронов, взаимодействовавших с атомами ртути, производилось по измерению I — силы анодного тока. Наблюдавшаяся зависимость $I(U)$ представлена на рисунке 4 в таблице 12. Из него следовало, что внутренняя энергия атома ртути *не может принимать произвольные значения*; для его возбуждения (при соударении с электроном) нужна энергия 4,9 эВ — не больше и не меньше. Это и есть, очевидно, тот квант энергии, которым атом ртути обменивается с электроном.

8.4 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ С ИЗЛУЧЕНИЕМ ПО ЭЙНШТЕЙНУ

Квантовые переходы между энергетическими уровнями атомов отражают суть процессов взаимодействия излучения с веществом (процессов испускания и поглощения излучения). Фотоны (кванты света) органически вписываются в эту картину. Когда атом переходит с уровня E_2 на уровень E_1 , рождается фотон; при обратном переходе фотон уничтожается — см. рисунок 5 в таблице 12. Схемы на этом рисунке кажутся сегодня очень простыми. Но в 1913 году они таковыми не казались. Они вызвали целый ряд вопросов. Вот два из них.

Первый вопрос: чем вызываются (инициируются) те или иные квантовые переходы? *Второй вопрос* касался отмечавшейся в свое время еще

Резерфордом проблемы, связанной с самой идеей квантового перехода. Чтобы совершить переход между двумя данными энергетическими уровнями, атом должен поглотить или испустить фотон *определенной*, а не какой-либо иной энергии. Каким же образом атом производит «выбор» фотона *нужной* энергии?

Ответ на второй вопрос был найден в 20-х годах XX столетия; мы остановимся на нем немного позднее. А сейчас обратимся к первому вопросу. Ответ на него был дан Эйнштейном в 1916 году в работе «Испускание и поглощение излучения по квантовой теории», а также в уже упоминавшейся нами работе «К квантовой теории излучения».

Прежде всего отметим, что Эйнштейн исходил из *вероятностной природы квантовых переходов*: он пишет о вероятности того или иного перехода, употребляет термины «вероятностный закон» и «статистический закон». Надо сказать, что вероятностный подход к рассмотрению атомных процессов был предопределен, по сути дела, уже при рождении квантовой физики, — когда Планк предложил рассматривать испускание излучения как *прерывистый* процесс. В докладе «Исследование атома и закон причинности», прочитанном в 1952 году в Сент-Галлене, Вернер Гейзенберг отмечал:

«Планк показал, что излучающий атом теряет свою энергию не равномерно, а прерывно, толчками. Этот прерывистый, скачкообразный характер излучения энергии, как и все прочие представления атомной теории, приводил к предположению, что излучение представляет собой статистический феномен. Но прошло два с половиной десятилетия, прежде чем обнаружилось, что квантовая теория фактически вынуждает даже законы формулировать как статистические законы и *принципиально* отойти от лапласовского детерминизма».

Отмеченный в докладе Гейзенберга принципиальный отход от лапласовского детерминизма достаточно явно обозначился в работах Эйнштейна в 1916 году. С *позиций вероятности* Эйнштейн рассмотрел задачу о взаимодействии равновесного излучения с термодинамически равновесным коллективом атомов, способных испускать и поглощать излучение. Для простоты он ограничился всего двумя уровнями энергии атома E_1 и E_2 . Излучение имело частоту $\nu_{12} = (E_2 - E_1)/h$. Эйнштейн выделил три фундаментальных процесса взаимодействия атомов с излучением и рассмотрел вероятности этих процессов, отнесенные к единице времени.

Первый процесс — спонтанное испускание излучения атомами: атом спонтанно переходит (перескакивает) с уровня E_2 на уровень E_1 , испуская фотон с энергией $h\nu_{12}$ — см. верхнюю половину рисунка 5 в таблице 12. Спонтанность процесса означает, что он не зависит от каких-

либо внешних факторов, с помощью которых им можно было бы как-то управлять. Данный процесс напоминает радиоактивный распад атомного ядра; он имеет ярко выраженный случайный характер. Случаен момент испускания спонтанного фотона, случайно направление его движения.

Второй процесс — индуцированное (вынужденное) испускание излучения атомами. Оно происходит под воздействием электромагнитного излучения частоты ν_{12} ; поэтому вероятность такого процесса пропорциональна плотности излучения на данной частоте. Фотон с энергией $h\nu_{12}$ инициирует квантовый переход с уровня E_2 на уровень E_1 ; в результате появляется еще один фотон с энергией $h\nu_{12}$ — см. рисунок 6 в таблице 12.

Вынужденное испускание излучения не может не вызывать удивления. Оказывается, фотоны могут играть роль «спускового крючка», заставляющего атомы высвечиваться. Получается, что с увеличением плотности излучения вблизи атома должна возрасти вероятность не только поглощения (что вполне понятно), но также и испускания, что еще больше увеличит плотность излучения. Интересно, что само введение процесса вынужденного испускания Эйнштейном было вынужденным актом, — Эйнштейну нужно было согласовать получающиеся результаты с формулой Планка (той самой, которую тот получил еще в 1900 году, занимаясь проблемой теплового излучения). Еще более интересно, что столь искусственно родившееся вынужденное излучение оказалось спустя примерно сорок лет ничем иным, как излучением *мазеров* и *лазеров*.

Эйнштейн показал, что излучение, испущенное при вынужденных переходах, должно иметь *точно такие же характеристики*, что и первичное излучение, инициировавшее эти переходы. В элементарном акте вынужденного испускания вместо одного (первичного) фотона появляются два фотона (первичный плюс родившийся). Эти два фотона должны иметь не только одинаковую энергию, но также одинаковую поляризацию и одинаковое направление импульса. Можно сказать, что фотон, родившийся при вынужденном испускании, является *точной копией* первичного фотона; оба фотона находятся точно в одном и том же состоянии. Разумеется, эти «точно» отнюдь не отменяют вероятностной природы вынужденного испускания. У пролетающего вблизи атома фотона есть три альтернативы: 1) фотон поглощается атомом, 2) фотон пролетает мимо, вызывая испускание атомом фотона. 3) фотон пролетает мимо, не инициируя квантового перехода в атоме. Каждая альтернатива характеризуется некоторой *вероятностью*.

Третий процесс — поглощение излучения атомами — является по своей сути вынужденным процессом, вероятность которого про-

порциональна плотности излучения. Он не нуждается в дополнительных комментариях. Элементарный акт поглощения фотона атомом показан в нижней половине рисунка 5 в таблице 12.

Отметим, что вероятность поглощения фотона больше вероятности вынужденного испускания, когда на уровне E_1 находится больше атомов, чем на уровне E_2 . Если же на верхнем энергетическом уровне окажется больше атомов, чем на нижнем (в этом случае говорят об *инверсной заселенности уровней*), то вероятность поглощения фотона будет меньше вероятности вынужденного испускания.

Отмечая важность работ Эйнштейна для развития квантовой теории, Гейзенберг писал, что после этих работ «внимание все более смешалось с энергии стационарных состояний к *вероятности перехода* из одного стационарного состояния в другое» (курсив наш. — Л.Т.).

8.5 ЗАГАДОЧНЫЕ ДЕБРОЙЛЕВСКИЕ «ВОЛНЫ МАТЕРИИ» И КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Развитие фотонных представлений привело к широкому признанию в начале 20-х годов идеи *корпускулярно-волнового дуализма* для электромагнитного излучения. С излучением, имеющим частоту ν и волновой вектор $\mathbf{k}$ (напомним: $\mathbf{k} = 2\pi/\lambda = 2\pi\nu/c$, где λ — длина волны излучения), можно сопоставить поток фотонов, имеющих энергию E и импульс $\mathbf{p}$, которые определяются соотношениями:

$$E = h\nu; \quad \mathbf{p} = (h/2\pi)\mathbf{k}. \quad (14)$$

С учетом того, что $\mathbf{k} = 2\pi\nu/c$, получаем из (14) хорошо знакомое нам равенство $p = E/c$.

В 1924 году молодой французский физик *Луи де-Бройль* (1892–1987), ставший одним из основоположников квантовой механики, выдвинул весьма смелую гипотезу. Он предложил распространить идею корпускулярно-волнового дуализма не только на излучение, но и *вообще на все микрообъекты*. Соотношения (14), установленные для фотонов, де-Бройль предложил применить ко всем микрообъектам — независимо от того, есть ли у них масса покоя, или же ее нет (как это имеет место в случае фотонов). Таким образом, с любым микрообъектом следовало сопоставлять, с одной стороны, *корпускулярные* характеристики (E и $\mathbf{p}$), а с другой стороны — *волновые* характеристики (ν и $\mathbf{k}$). Необычность такой гипотезы заключалась прежде всего в том, что микрообъектам, которые

до этого рассматривались как корпускулы, например электронам, приписывались теперь также и волновые свойства. Связь между корпускулярными и волновыми характеристиками микрообъекта устанавливалась через постоянную Планка h . Это как раз и есть соотношения (14).

В случае фотонов величина λ есть длина волны излучения. В применении же к микрообъектам, имевшим массу покоя, величину λ стали называть «*дебройлевской длиной волны*» микрообъекта. Для нее обычно используют выражение

$$\lambda = h/p \quad (15)$$

(оно немедленно получается из (14) с учетом того, что $k = 2\pi/\lambda$). Напомним, что согласно специальной теории относительности $p = \gamma m_0 v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, где m_0 — масса покоя микрообъекта.

Однако как же все-таки понимать наличие у электрона (или атома, или молекулы) волновых свойств? Что физически скрывается под термином «*дебройлевская волна*»? *Насколько она реальна?* Надо сказать, что де-Бройль и многие физики считали в то время эти волны *реальными волнами*, в какой-то мере аналогичными электромагнитным волнам. В 1925 году де-Бройль предложил загадочный термин «*волны материи*», а для математического описания этих волн он ввел величину, названную им «*волновой функцией*».

В 1927 году американский физик *Клинтон Джозеф Дэвиссон* (1881–1958) и независимо от него английский физик *Джордж Паджет Томсон* (1892–1975), сын знаменитого Дж.Дж. Томсона, обнаружили *дифракцию электронов*. Дебройлевские «волны материи» дифрагировали на кристаллической решетке мишени, создавая на экране характерную картину дифракционных колец. На рисунке 1 в таблице 13 представлена фотография дифракции рентгеновских лучей на белом олове, а на рисунке 2 можно видеть фотографию дифракции электронов на том же белом олове. В обоих случаях использовался метод, показанный на рисунке 3. Мишень облучалась электронами с энергией 100 кэВ; ей отвечает длина волны электрона, равная 0,04 Å. Сходство фотографий на рисунках 1 и 2 поразительно и не оставляет сомнения в том, что электроны и рентгеновские лучи одинаковым образом дифрагируют на кристаллах олова.

Опыты по дифракции электронов рассматривались как убедительное доказательство существования «волн материи», хотя физическая сущность таких волн оставалась непонятной.

Таблица 13. Дебролейвские «волны материи»



Рис.1

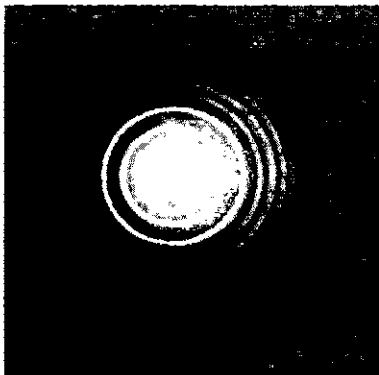


Рис.2

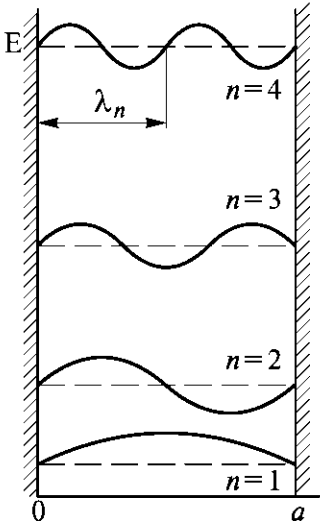


Рис.4

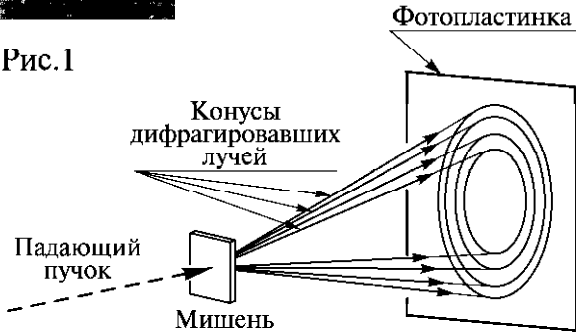


Рис.3

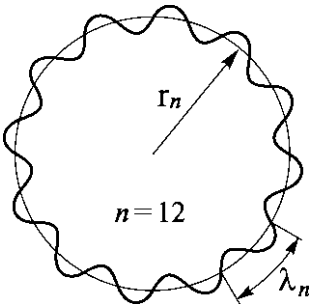


Рис.5

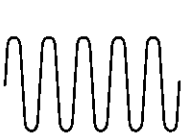


Рис.6

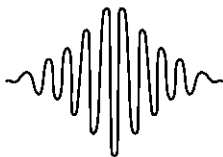


Рис.7

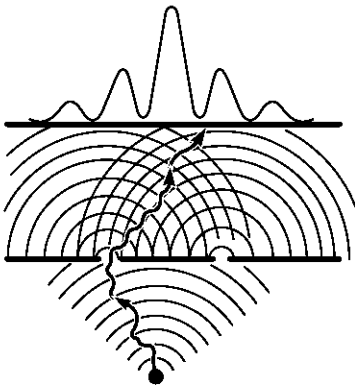


Рис.8

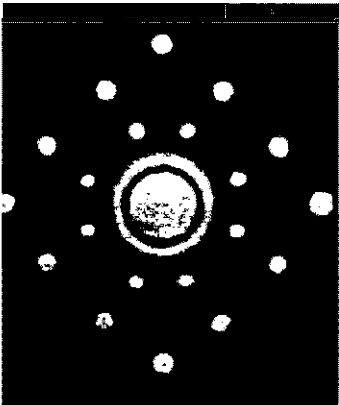


Рис.9

В 1949 году известный российский физик *Валентин Александрович Фабрикант* (1907–1991) поставил интересный опыт. Он использовал настолько слабый электронный пучок, что промежуток времени между двумя электронами в 30 000 раз превышал время, необходимое для прохождения электрона через прибор. Это давало уверенность в том, что на поведение электрона, проходящего через прибор, другие электроны пучка влияния не оказывают. Опыт показал, что при длительной экспозиции, позволяющей зарегистрировать достаточно большое число электронов, на фотопластинке возникает такая же дифракционная картина, что и в случае электронных пучков обычной интенсивности. Отсюда следует, что волновые свойства электронов нельзя объяснить как некий эффект коллектива; «волновыми» свойствами обладает *каждый отдельно взятый электрон*.

Уже давно установлено, что и другие микрообъекты (протоны, нейтроны, атомы и т. д.) обладают волновыми свойствами. Стали привычными термины «электронная оптика» и «нейтронная оптика». Существуют технические установки, в основе действия которых лежат волновые свойства микрообъектов (например, электронный микроскоп или нейтронное зеркало). На рисунке 9 в таблице 13 сфотографирована *дифракция нейтронов*; этот снимок получен в начале 60-х годов.

Однако вернемся в 20-е годы прошлого столетия. После открытия дифракции электронов *волновая концепция* в квантовой теории стала весьма популярной. Используя дебройлевскую волну электрона, можно было убедиться в том, что *энергия электрона, движущегося в ограниченном пространстве, должна квантоваться*.

Полезно рассмотреть простую задачу об энергетических уровнях E_n электрона, находящегося внутри одномерной потенциальной ямы с бесконечно высокими стенками. Естественно потребовать, чтобы на ширине a ямы укладывалось целое число n электронных полуволен (см. рисунок 4 в таблице 13):

$$a = n\lambda_n/2. \quad (*)$$

В соответствии с (15) $\lambda_n = h/p_n$. Учитывая, что

$$p_n = \sqrt{2mE_n}, \quad (**)$$

получаем из (*): $a = hn/\sqrt{8mE_n}$. Таким образом.

$$E_n = n^2h^2/(8ma^2). \quad (***)$$

Дебройлевская волна позволяла весьма просто объяснить правило квантования момента импульса электрона в теории атома по Бору (соотношение (10)). Достаточно было принять, что стационарной (дозволенной) электронной орбитой является такая круговая орбита, на дли-

не которой укладывается целое число длин дебройлевской волны электрона (см. рисунок 5 в таблице 13):

$$2\pi r_n = n\lambda_n \quad (16)$$

(r_n — радиус n -ой стационарной орбиты). Подставляя сюда соотношение (15), находим:

$$2\pi r_n = nh/p_n. \quad (****)$$

Отсюда немедленно следует условие квантования (10).

Всего два десятка лет назад физикам пришлось привыкать к новому взгляду на электромагнитное излучение — сопоставлять с картиной электромагнитных волн картину фотонных потоков. Теперь им пришлось сопоставить с картиной электронов-корпускул картину загадочных электронных волн. Давно уже было ясно, что электромагнитные волны — это *отнюдь не классические волны*, которые без какой-либо среды в буквальном смысле «жить не могут». Подобно корпускулам, электромагнитные волны в среде обитания не нуждаются и могут распространяться в вакууме, т. е. в отсутствие какой бы то ни было среды. Теперь стало ясно, что электроны — это *отнюдь не классические корпускулы*, для которых явление дифракции принципиально невозможно. Электроны наглядно обнаруживают волновые свойства.

Корпускулярно-волновой дуализм требовал отказаться от крайностей («либо волна, либо корпускула») и заставлял размышлять над возможностью некоторого «среднего» варианта («в какой-то мере волна, в какой-то мере корпускула»). Можно сказать, что применительно к микрочастицам происходило *стирание четкой границы между волновыми представлениями и представлениями классическими*. И вполне естественно было желание как-то *смоделировать симбиоз волны и корпускулы* и тем самым *наглядно* представить корпускулярно-волновой дуализм.

Одна из подобных попыток связана с представлением микрообъекта в виде волнового образования конечных размеров. Это может быть просто «обрывок» волны (называемый *волновым цугом*) (см. рисунок 6 в таблице 13). Это может быть *волновой пакет* (см. рисунок 7 в той же таблице). Другая попытка связана с моделью *волны-пилота*, согласно которой микрообъект есть некоторое «соединение» корпускулярной «сердцевины» с волной, управляющей движением «сердцевины». Вообразим, что волна вызывается колебаниями некоего нового физического поля (назовем его условно ψ -полем). Взаимодействие «сердцевины» с ψ -полем приводит к тому, что «сердцевина» обнаруживает тенденцию находиться в тех областях пространства, где напряженность ψ -поля наибольшая.

Этому мешают неупорядоченные движения «сердцевин», которые могут быть обусловлены, например, флуктуациями ψ -поля. Флуктуации предопределяют неупорядоченные блуждания микрообъекта, а взаимодействие «сердцевин» с ψ -полем заставляет микрообъект устремляться туда, где ψ -поле наиболее интенсивно. Рисунок 8 в таблице 13 иллюстрирует данную модель в примере с прохождением микрообъекта через экран с двумя щелями: ψ -волна испытывает дифракцию на щелях, а «сердцевина» проходит через одну из щелей и регистрируется на экране-детекторе в соответствии с результатом интерференции ψ -волн.

Подобные модели могут с первого взгляда показаться вполне привлекательными. Однако сразу же подчеркнем: *все они несостоятельны*. Как мы убедимся позднее, всякая попытка *буквального* толкования корпускулярно-волнового дуализма заведомо бесполезна. *Микрообъект не является ни корпускулой, ни волной, ни симбиозом корпускулы и волны.*

8.6 СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Будем исходить из того, что для микрообъекта справедливо соотношение (15): $p = h/\lambda$. Оно связывает *определенное* значение импульса микрообъекта p с *определенным* значением его длины волны λ . Длина волны может иметь определенное значение только тогда, когда она представляет собой бесконечную синусоиду, простирающуюся во всем пространстве. *Длина волны в данной точке — это бессмыслица. Значит, не должно иметь смысла и строго определенное значение импульса микрообъекта в данной точке пространства* (коль скоро мы полагаем, что для микрообъекта выполняется соотношение (15)). В связи с этим немедленно утрачивает смысл понятие траектории в применении к микрообъекту, поскольку для ее существования необходимо, чтобы в каждый момент времени были определены *одновременно* и импульс, и координата.

Итак, *микрообъект не может иметь одновременно сколь угодно точно определенную координату и сколь угодно точно определенный импульс*. Стремясь, например, точнее фиксировать x -координату микрообъекта (стремясь уменьшить неопределенность Δx ее значения), мы неизбежно будем переводить микрообъект в *такие состояния*, в которых x -проекция его импульса будет характеризоваться все большей неопределенностью Δp_x . Наоборот, стремясь точнее фиксировать x -проекцию импульса микрообъекта, мы неизбежно будем переводить его в состояния, в которых x -координата будет все более неопределенной.

Рассмотрим плоскость с осями x и p_x (см. рисунок 1 в таблице 14). Если бы объект подчинялся законам классической механики (и являлся, простоты ради, материальной точкой), то любое его состояние представлялось бы на этой плоскости в виде некоторой точки. Так, точка A задавала бы состояние объекта, в котором он имеет координату x^A и проекцию импульса p_x^A . Состоянию же микрообъекта соответствует на данной плоскости некоторый прямоугольник площадью, примерно равной $h/2\pi$. На приведенном рисунке показаны 7 разных состояний. В состоянии 1 неопределенности Δx и Δp_x одинаковы. При переходе последовательно к состояниям 2, 3, 4 неопределенность Δx уменьшается, зато неопределенность Δp_x возрастает. При переходе последовательно от состояния 1 к состояниям 5, 6, 7 уменьшается неопределенность Δp_x , зато возрастает неопределенность Δx . Заметим, что на рисунке:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = \Delta x' \cdot \Delta p_x' = \Delta x'' \cdot \Delta p_x'' = \Delta x''' \cdot \Delta p_x''' = \Delta x'''' \cdot \Delta p_x''''.$$

Все то же самое можно было бы рассказать, рассматривая плоскость с осями y и Δp_y , а также плоскость с осями z и p_z .

Как показал в 1927 году Вернер Гейзенберг, неопределенности координат и соответствующих проекций импульса связаны соотношениями:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx \frac{h}{2\pi}; \quad \Delta y \cdot \Delta p_y \approx \frac{h}{2\pi}; \quad \Delta z \cdot \Delta p_z \approx \frac{h}{2\pi}. \quad (17)$$

Соотношение $E = h\nu$ связывает *определенное* значение энергии микрообъекта с *определенным* значением его частоты. Частота может иметь строго определенное значение лишь тогда, когда происходят бесконечно долго гармонические колебания. *Частота в данный момент времени — это бессмыслица*. Но в таком случае не имеет смысла также и энергия микрообъекта в данный момент времени (коль скоро мы приняли, что для микрообъекта справедливо соотношение $E = h\nu$). Вернер Гейзенберг показал, что для микрообъектов неопределенность энергии в том или ином состоянии (неопределенность ΔE) связана с временем существования микрообъекта в этом состоянии (Δt) соотношением неопределенностей

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \frac{h}{2\pi}. \quad (18)$$

Если, в частности, микрообъект находится в стационарном состоянии (Δt сколь угодно велико), то его энергия имеет определенное значение ($\Delta E = 0$).

Соотношения (17) и (18) — знаменитые *соотношения неопределенностей Гейзенберга для координаты — импульса и для энергии — времени*, соответственно. Комментируя их, Гейзенберг отмечал: «Мы не можем интерпретировать процессы в атомарной области так же, как процессы большого масштаба. Если же мы продолжаем пользоваться привычными понятиями, то их применимость надо ограничивать соотношениями неопределенности».

НЕЗАПЛАНИРОВАННЫЙ ДИАЛОГ

Читатель. Однако у меня создается впечатление, что гейзенберговские соотношения неопределенностей не просто *ограничивают* применимость привычных понятий, а фактически их *разрушают*. Например, полную энергию E всегда представляли как сумму кинетической и потенциальной энергий:

$$E = p^2/(2m) + U(\mathbf{r}), \quad (19a)$$

а момент импульса $\mathbf{M}$ есть, как мне известно, векторное произведение радиус-вектора (т. е. координаты объекта) на импульс:

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}. \quad (19b)$$

Теперь же получается, что выражения (19) попросту *теряют смысл*, поскольку координата и импульс микрообъекта не могут одновременно принимать определенные значения.

Автор. Чтобы как-то успокоить Вас, скажу, что выражения (19) сохраняются в математическом аппарате квантовой механики. Но только теперь они выступают не в качестве собственно физических величин, представляемых функциями пространственных координат и времени, а в качестве *соответствующих этим величинам* так называемых *операторов* (оператора энергии, оператора координаты, оператора импульса, оператора момента импульса и других).

Читатель. Это меня несколько не успокоило. Такое «разъяснение» ничего мне не разъяснило хотя бы потому, что я впервые слышу о математическом понятии «оператор».

Автор. Конечно, здесь следовало бы обстоятельно поговорить о специфике математического аппарата квантовой механики. Не имея времени на это, ограничимся «поверхностным разговором». Полагаю, что он тоже полезен. Как Вы, наверное, хорошо представляете, математический аппарат классической физики имеет дело с *функциями*. Функцию можно рассматривать как некое математическое «устройство», которое *по числу дает число*. Вы «вводите» в функцию некоторое число, и

она «выдает» Вам некоторое число, вообще говоря другое. При переходе от классической физики к квантовой *функции заменяют операторами*. Оператор можно рассматривать как некое математическое «устройство», которое *по функции дает функцию*. Вы «вводите» в оператор некоторую функцию, и он «выдает» Вам некоторую функцию, вообще говоря другую.

Читатель. Я пытаюсь уловить логическую нить рассуждений. Физические величины (энергия, импульс, координата и другие), бывшие раньше функциями, стали теперь операторами. А что же представляют в такой схеме те самые *функции*, которые теперь следует «вводить» в операторы? Физическими величинами они являться не могут. Чем же они являются?

Автор. Вопрос, что называется, в точку. Они, эти функции, являются *состояниями микрообъекта*. Чтобы задать то или иное состояние материальной точки в классической механике, надо было задать шесть чисел — три координаты (x, y, z) и три проекции импульса (p_x, p_y, p_z). Но в квантовой механике, где мы имеем дело с микрообъектами, принципиально нельзя задать сразу все указанные шесть чисел. Мы говорили выше о состояниях микрообъекта, различающихся по степени неопределенности координаты и импульса. На рисунке 1 в таблице 14 эти различные состояния условно представлялись в виде нескольких прямоугольников разной формы. Можно теперь представить себе состояние микрообъекта, в котором проекции импульса имеют определенные значения, а координаты могут принимать значения на всей числовой оси. Такое состояние удобно математически описывать *параметрической функцией* вида

$$\Phi_{p_x, p_y, p_z}(x, y, z),$$

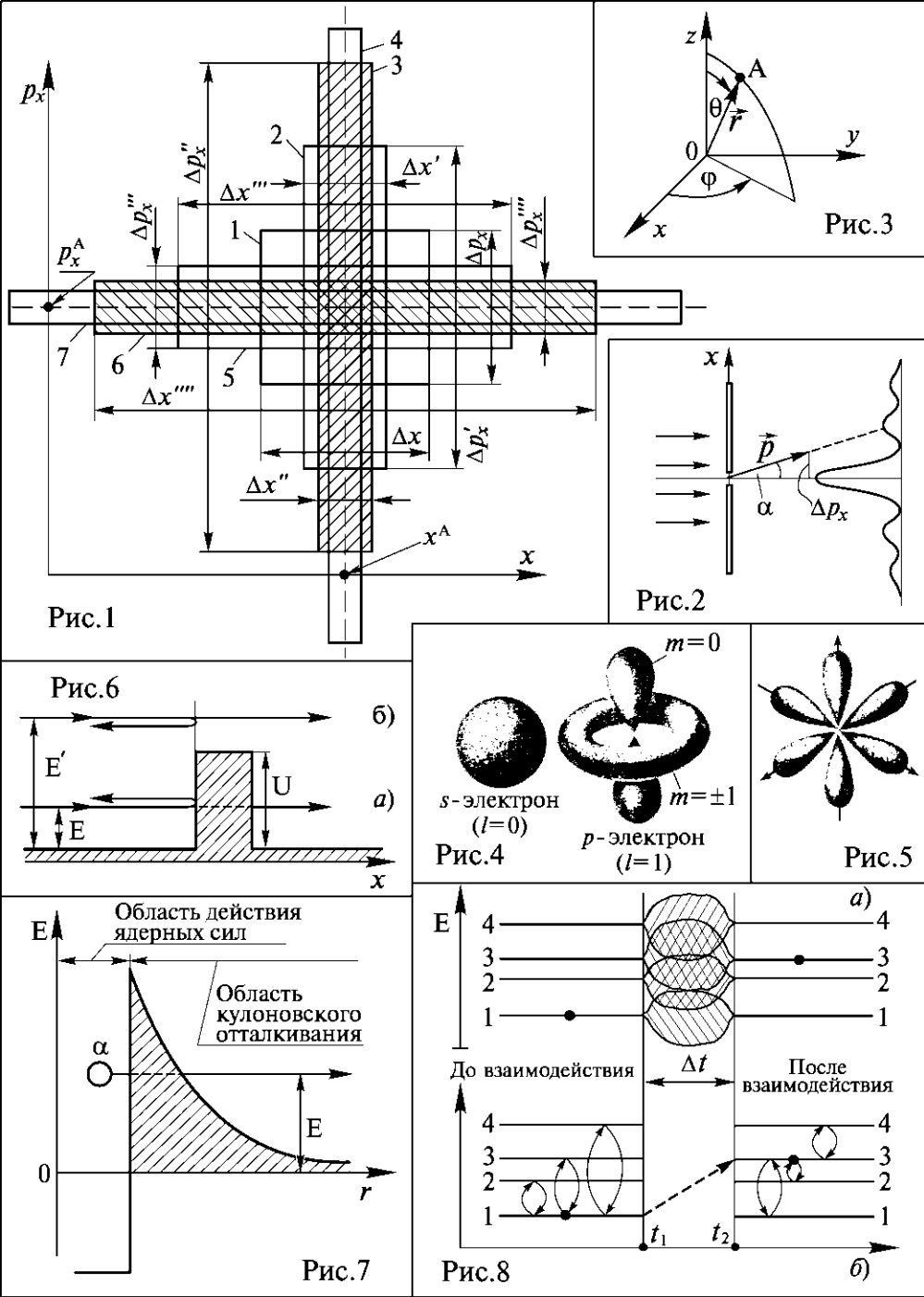
где параметром являются три *определенных* числа — проекции импульса, а аргументами служат координаты, значения которых могут *варьироваться* от $-\infty$ до $+\infty$.

Читатель. И каков же смысл такой функции?

Автор. Поначалу она появилась в аппарате квантовой механики как дебройлевская «волновая функция» и рассматривалась в духе классической физики не как *состояние микрообъекта*, а как некая *физическая величина*, нечто вроде напряженности физического трехмерного поля. Но вскоре было понято, что «волновую функцию» надо рассматривать в принципиально ином ключе. Ниже (в следующем параграфе) мы как раз и поговорим об этом.

Читатель. Я бы не сказал, что мне теперь «все понятно». Однако появился какой-то «свет в конце туннеля».

Таблица 14. Соотношения неопределенностей Гейзенберга



Автор. Пока этого вполне достаточно. Чтобы действительно «выйти из туннеля», необходимо систематическое изучение квантовой механики, предполагающее работу с операторами-величинами и функциями-состояниями.

Соотношения неопределенностей Гейзенберга появились у нас как *логическое* следствие корпускулярно-волнового дуализма (мы исходили из соотношений $p = h/\lambda$ и $E = h\nu$ для микрообъекта). Нетрудно показать, как можно вывести одно из соотношений (17) фактически *прямо из соотношения* $p = h/\lambda$. Предположим, что на пути параллельного пучка электронов с импульсом p поставлен экран с узкой щелью, ширина которой в направлении оси x (направлении, перпендикулярном пучку) равна d . При прохождении электронов через щель наблюдается дифракция — см. рисунок 2 в таблице 14. Обозначим через α угол между исходным направлением пучка и направлением на первый (основной) дифракционный максимум. Классическая волновая теория дает следующее выражение для этого угла: $\sin \alpha = \lambda/d$. Поскольку угол α достаточно мал, то упомянутое выражение можно переписать в виде:

$$\alpha \approx \lambda/d. \quad (21)$$

Используя соотношение $p = h/\lambda$, перепишем (21) на «корпускулярном языке»:

$$\alpha \approx h/(pd). \quad (22)$$

Как понимать на этом «языке» сам факт существования угла α ? — Он означает, что при прохождении через щель электрон приобретает импульс Δp_x в направлении оси x . Ясно, что $\Delta p_x \approx p\alpha$. Подставляя сюда (22), получаем $\Delta p_x \approx h/d$. Рассматривая d как неопределенность Δx для x -координаты электрона, проходящего через щель, приходим выражению $\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$, т.е. фактически к соотношению неопределенностей для координаты и импульса. Итак, попытка зафиксировать в какой-то мере (с помощью узкой щели) координату электрона в направлении, перпендикулярном его движению, приводит к возникновению неопределенности импульса электрона в этом направлении.

8.7 ОТ «ВОЛН МАТЕРИИ» К «ВОЛНАМ ВЕРОЯТНОСТИ»

В 1926 году известный австрийский физик-теоретик, один из создателей квантовой механики *Эрвин Шрёдингер* (1887–1961) предложил уравнение для дебройлевской волновой функции, описывающей стационарные

состояния микрообъектов, находящихся в тех или иных конкретных условиях (например, в атоме водорода). Шредингер использовал оператор энергии, который «действовал» на волновую функцию, в результате чего получалось произведение соответствующего дискретного значения энергии на волновую функцию, описывающую данное стационарное состояние. *Уравнение Шредингера для стационарных состояний* запишем в следующем виде (который несколько отличается от общепринятого):

$$\hat{H} \{ \varphi_N(\mathbf{r}) \} = E_N \cdot \varphi_N(\mathbf{r}). \quad (23)$$

Здесь через $\hat{H}$ обозначен оператор энергии микрообъекта (его принято называть *гамильтонианом*), через $\varphi_N(\mathbf{r})$ обозначена волновая функция, описывающая N -ое стационарное состояние микрообъекта, E_N — N -й энергетический уровень микрообъекта. Скобки $\{...\}$ мы ввели здесь лишь для того, чтобы показать, что функция $\varphi_N(\mathbf{r})$ «вводится» в гамильтониан.

Уместно привести отрывки из статьи Гейзенберга о первых шагах квантовой механики, в которой он, в частности, пишет о появлении работы с уравнением Шредингера и о выдающемся достижении немецкого физика-теоретика *Макса Борна* (1882–1970), благодаря которому Борн получил право считаться одним из создателей квантовой механики:

«1926-й год начался с сенсации. Сначала по слухам, а затем в виде корректурных листов мы получили сведения о работе Шредингера по волновой механике, где задача определения энергетических уровней в атоме водорода решалась просто как проблема отыскания собственных значений гамильтониана для трехмерных материальных волн... Еще в конце 1925 года Борн вместе с Норбертом Винером создали в Америке математическую формулировку квантовой механики, включавшую понятие линейного оператора и позволявшую, как выяснилось задним числом, перейти к формализму волновой механики Шредингера. Правда, Борн и Винер не сумели отыскать этот переход... Шредингер понимал свои волны как *настоящие трехмерные материальные волны* и намеревался полностью изгнать из квантовой теории черты прерывности, в особенности так называемые квантовые переходы. Я протестовал против этого, но к согласию тогда прийти не удалось...

Тем временем Борн достиг существенного прогресса. Он исследовал шредингеровские волны не в трехмерном, а в многомерном конфигурационном пространстве. Он высказал гипотезу, что *квадрат модуля волновой функции следует считать мерой вероятности существования соответствующей конфигурации*. Это было равносильно тезису, что материальные волны в трехмерном пространстве *не позволяют удовлетворительным образом описать природу* и что квантовая теория содержит определенный статистический элемент» (курсив наш. — Л.Т.).

Макс Борн предложил интерпретировать волновую функцию принципиально иначе, чем это делали Шредингер и де-Бройль. Он предло-

жил вероятностную (статистическую) интерпретацию волновой функции. По Борну, квадрат модуля волновой функции $\varphi_N(\mathbf{r})$, получаемой при решении уравнения Шредингера (т. е. функция $|\varphi_N(\mathbf{r})|^2$) есть плотность вероятности того, что микробъект, находящийся в N -м состоянии, будет обнаружен в точке пространства, определяемой радиус-вектором $\mathbf{r}$. Такая интерпретация требовала замены «волн материи» чисто математическими «волнами вероятности» (которые, кстати говоря, могли рассматриваться не только в реальном трехмерном пространстве, но и в «пространстве» других величин, например, в «пространстве импульсов»).

«Любопытно, что лишь в 1954 году Макс Борн был удостоен Нобелевской премии по физике за вероятностную интерпретацию волновой функции. Известно высказывание Борна: «То обстоятельство, что признание пришло с опозданием в 28 лет, не удивительно, поскольку все великие физики первого периода развития квантовой теории были противниками статистического толкования (Планк, де-Бройль, Шредингер, сам Эйнштейн). Шведской академии было не просто выступить против этих влиятельных голосов, так что мне оставалось ждать до тех пор, пока мои идеи не станут достоянием физиков, — не без помощи Нильса Бора и его копенгагенской школы...».

Допустим, микробъект — это электрон в атоме. Его стационарные состояния описываются набором квантовых чисел: *главным* квантовым числом n ($n = 1, 2, 3, \dots$), *орбитальным* квантовым числом l ($l = 0, 1, 2, \dots, N - 1$), *магнитным* квантовым числом m ($m = -l, -l + 1, \dots, l - 2, l - 1, l$). Таким образом, число N превращается в данном случае в комбинацию чисел n, l, m . Радиус-вектор $\mathbf{r}$ выразим (как это принято) не через *декартовы* координаты x, y, z , а через *сферические* координаты r, θ, φ — они показаны на рисунке 3 в таблице 14. Теперь волновую функцию $\varphi_N(\mathbf{r})$ следует переписать в виде $\varphi_{nlm}(r, \theta, \varphi)$. Плотность вероятности обнаружить электрон с квантовыми числами n, l, m в точке пространства с координатами r, θ, φ есть, по Борну,

$$\rho(r, \theta, \varphi) = |\varphi_{nlm}(r, \theta, \varphi)|^2. \quad (24)$$

Вместо электронной орбиты теперь рассматривается своеобразное «*электронное облако*», плотность которого в разных точках вблизи атомного ядра пропорциональна функции $\rho(r, \theta, \varphi)$. На рисунке 4 в таблице 14 показаны формы таких «облаков» для электронов с $l = 0$ (их называют *s-электронами*) и с $l = 1$ (так называемые *p-электроны*). Не входя в детали, заметим, что если атом рассматривается не свободным, а связанным в молекуле, то «облака» *p-электронов* принимают вид, показанный на рисунке 5.

Итак, на смену «волн материи» пришли «волны вероятности». Вероятностная трактовка волновой функции отражает присущие микрообъектам элементы *объективной случайности* в их поведении. Необходимой оказывается *вероятность поведения микрообъекта*. Это означает, что *предсказания в квантовой физике имеют, вообще говоря, вероятностный характер* и, следовательно, физика микрообъектов является *принципиально статистической* теорией.

Вероятность лежит в самой *основе* квантовой механики и вообще квантовой физики. Это неоднократно подчеркивали многие выдающиеся физики. «Статистические методы в физике, — писал Макс Борн, — по мере развития науки распространялись все больше и больше, и сегодня можно сказать, что современная физика полностью опирается на статистическую основу». Крупный специалист в области квантовой механики, российский академик *Владимир Александрович Фок* (1898–1974) подчеркивал: «В квантовой механике понятие вероятности есть понятие первичное, оно играет там фундаментальную роль».

8.8 НЕКОТОРЫЕ СЛЕДСТВИЯ ИЗ СООТНОШЕНИЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Постулируя стационарные состояния, теория Бора не объяснила, почему все-таки электрон не излучает на орбите и не падает в итоге на ядро. Соотношения (17) это объясняют. Падение на ядро означало бы весьма сильное уменьшение неопределенности координат электрона. Если до падения на ядро электрон локализован в пределах всего атома, т. е. в пределах области пространства диаметром порядка 10^{-10} м, то после падения он должен был бы локализоваться в области диаметром менее 10^{-14} м. Согласно (17) более сильная локализация электрона в пространстве связана с «размытием» его импульса; значит, при падении на ядро среднее значение импульса электрона должно было бы возрасти, для чего потребовалась бы энергия. Получается, что требуются усилия отнюдь не для того, чтобы «удержать» электрон от падения на ядро, а совсем наоборот — нужны усилия, чтобы «заставить» электрон локализоваться в пределах ядра. Нетрудно оценить энергию, необходимую для этого. Она пропорциональна квадрату неопределенности импульса электрона, а значит, если учесть соотношения неопределенностей, обратно пропорциональна квадрату диаметра области локализации. Диаметр ядра в 10^4 раз меньше диаметра атома;

следовательно, энергия электрона в ядре должна быть в 10^8 раз больше, чем в атоме, т. е. должна была бы равняться 10^9 эВ (напомним, что энергия электрона в атоме порядка 10 эВ). Получается, что даже «наильно» нельзя «заставить» электрон локализоваться внутри атомного ядра — ведь энергия связи нуклонов в ядре не превышает 10^7 эВ. Тем самым не только снимается проблема «падения электрона на ядро», но и выясняется важное обстоятельство: *в состав атомного ядра электроны входят не могут.*

Из (17) следует, что понятие траектории, строго говоря, неприменимо к электрону; мы уже отмечали это, обращая внимание на то, что электронные орбиты в атоме не существуют. Однако в некоторых ситуациях понятием «траектория электрона» пользоваться допустимо. Примером могут служить хорошо наблюдаемые в камере Вильсона, пузырьковой камере, фотоэмульсиях траектории заряженных микрочастиц (в частности, электронов). Еще один пример — движение электронов в кинескопе телевизора.

Рассмотрим последний пример подробнее. Импульс электрона, движущегося вдоль оси телевизионной трубки, есть $p = \sqrt{2meV}$, где V — ускоряющее напряжение. Формирование электронного пучка означает известную локализацию координаты электрона в поперечном направлении; степень локализации определяется диаметром пучка d . Согласно (17) должна существовать неопределенность импульса электрона в направлении, перпендикулярном к оси пучка: $\Delta p \approx \frac{h}{2\pi d}$. Вследствие этой неопределенности электрон может отклоняться от оси пучка в пределах угла $\Delta\alpha \approx \frac{\Delta p}{p} \approx \frac{h}{2\pi p d}$. Если L — длина пути электрона в кинескопе, то неопределенность положения точки попадания электрона на экран равна

$$\Delta x \approx L \cdot \Delta\alpha \approx \frac{Lh}{2\pi p d}. \quad (*)$$

Полагая $V = 20$ кВ и учитывая, что 1 электронвольт равен энергии $1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг, а масса электрона $m = 0,9 \cdot 10^{-27}$ г, находим импульс электрона: $p = \sqrt{2meV} = 7,6 \cdot 10^{-18}$ г·см/с. Воспользуемся этим результатом, учтем, что $h = 6,6 \cdot 10^{-27}$ эрг·с и положим: $d = 10^{-3}$ см, $L = 20$ см. Тогда из (*) получаем, что $\Delta x \approx 3 \cdot 10^{-6}$ см. Таким образом, $\Delta x \ll d$. Мы видим, что определяемое соотношением неопределенностей «размытие» точки попадания электрона на экран трубки кинескопа оказывается значительно меньше диаметра пучка. Ясно, что в данном случае можно говорить о траектории электрона.

Теперь рассмотрим одно из следствий соотношения (18). Предположим, что имеется *потенциальный барьер*, высота которого U больше энергии E микрообъекта (см. рисунок 6а). Микрообъект движется слева направо и достигает барьера. Что дальше? Классическая корпускула отразится от барьера назад. Но в данном случае перед нами не классическая корпускула, а микрообъект. Есть вероятность, что он отразится от барьера. Однако есть также вероятность, что он «пройдет под барьером» и продолжит движение слева направо. Это можно объяснить, воспользовавшись соотношением (18). Пусть Δt — приблизительное время, в течение которого микрообъект взаимодействует с барьером. Согласно (18) энергия микрообъекта, взаимодействующего с барьером, уже не будет определенной, а будет характеризоваться неопределенностью

$$\Delta E \approx \frac{h}{2\pi \cdot \Delta t}.$$

Если эта неопределенность порядка высоты барьера, то последний перестает быть для микрообъекта непреодолимым препятствием — микрообъект с некоторой вероятностью может пройти сквозь потенциальный барьер. Этот специфически квантовофизический эффект называют *туннельным эффектом*. Подчеркнем, что при рассмотрении туннельного эффекта нельзя представлять движение микрообъекта по пунктирной прямой, изображенной на рисунке. Она соответствует классической траектории, а у микрообъекта во время его взаимодействия с барьером таковой нет даже приблизительно. Так что нет смысла пытаться «уличить» микрообъект в том, что он в какой-то момент времени «оказался под потенциальным барьером».

Размытие энергии микрообъекта во время его взаимодействия с потенциальным барьером может приводить также к *эффекту надбарьерного отражения* в случае, когда энергия микрообъекта, налетающего на барьер, больше высоты барьера — см. рисунок 6б. Этот эффект также является сугубо квантовофизическим.

При α -распаде радиоактивных атомных ядер происходит вылет из исходного ядра α -частицы. Данный факт является экспериментальным подтверждением существования туннельного эффекта — см. рисунок 7 в таблице 14. Внутри ядра α -частица пребывает в области действия мощных ядерных сил притяжения. Вне атомного ядра на α -частицу действует кулоновская сила отталкивания (ведь α -частица заряжена положительно). Ядерные и кулоновские силы как раз и создают тот потенциальный барьер (он на рисунке изображен штриховкой), который α -частица, прежде чем выбраться на волю, преодолевает благодаря туннельному эффекту.

В заключение вспомним об упоминавшемся в § 8.4 *противоречии квантовых переходов* (мы имеем в виду *второй вопрос*). Допустим, микрообъект находился вначале на уровне I , которому отвечает энергия E_1 . Начнем облучать микрообъект фотонами с разными энергиями. Покажем, как соотношение неопределенностей (18) может помочь микрообъекту «выбрать» нужный фотон, поглотив который микрообъект мог бы перейти, скажем, на уровень 3 (с энергией E_3). Как и в случае взаимодействия с потенциальным барьером, взаимодействие с фотонами приводит к «размыванию» энергии микрообъекта — уровни энергии приобретают неопределенность $\Delta E \approx \frac{h}{2\pi \cdot \Delta t}$, где Δt — время взаимодействия. Можно сказать, что во время взаимодействия с электромагнитным полем энергия микрообъекта может быть «какой угодно». После прекращения взаимодействия энергия микрообъекта должна снова принять одно из дозволенных дискретных значений. При этом есть вероятность того, что энергия микрообъекта окажется равной E_3 . В этом случае говорят, что микрообъект «поглотил фотон с энергией $h\nu = E_3 - E_1$ и перешел с уровня I на уровень 3 ». Сказанное иллюстрирует рисунок 8а в таблице 14. На рисунке условно выделены три области: до взаимодействия, во время взаимодействия, длящегося время Δt , и после взаимодействия.

Возможно также иное толкование квантового перехода (и тоже с использованием соотношения неопределенностей (18)). Можно допустить, что *временно* (в течение времени Δt) микрообъект может *без получения энергии извне* покинуть уровень I и побывать на других уровнях, возвращаясь всякий раз назад. Так, он может побывать на уровне 3 в течение времени Δt , не превышающего $\Delta t \approx \frac{h}{2\pi(E_3 - E_1)}$. Таким образом, фраза «микрообъект живет на уровне I » может пониматься весьма своеобразно — как беспрестанные переходы микрообъекта с этого уровня на другие — с обязательным возвращением всякий раз на исходный уровень. Такие переходы не могут быть обнаружены экспериментально: в отличие от реальных переходов их называют *виртуальными*. «Путешествуя» все время по уровням, микрообъект оказывается, естественно, в состоянии «выбрать» нужный фотон, чтобы совершить реальный переход, скажем, с уровня I на уровень 3 . Теперь микрообъект будет «жить» на уровне 3 , т. е. будет совершать виртуальные переходы уже не относительно уровня I , а относительно уровня 3 . Сказанное поясняет рисунок 8б в таблице 14.

Нужно подчеркнуть, что не следует придавать буквального смысла ни рисунку 8а, ни рисунку 8б. Это всего лишь две условных модели процесса квантового перехода. В действительности же все выглядит в некотором смысле проще: до и после взаимодействия с фотонами микрообъект характеризуется определенными уровнями энергии, а во время взаимодействия микрообъекта как такового, строго говоря, нет, а есть *единая квантовомеханическая система «микрообъект + электромагнитное излучение»*. Эта система существует конечное время и, согласно соотношению (18), не имеет каких-либо определенных уровней; неизвестно, что именно происходит в такой системе.

Последнее замечание означает, что сама постановка вопроса: *что происходит сначала — поглощение фотона или переход?* — оказывается лишенной смысла. Природа не дает ответа на этот вопрос. Во время взаимодействия нет ни микрообъекта, ни фотонов, а есть нечто единое целое, к которому и надо относиться как к единому целому.

На рассмотренном примере мы убеждаемся, что *квантовая механика устанавливает предел нашему стремлению (нашей привычке) безгранично детализировать изучаемый процесс во времени.*

8.9 ЧТО ТАКОЕ МИКРООБЪЕКТ? МОЖНО ЛИ ЕГО НАГЛЯДНО ПРЕДСТАВИТЬ?

Автор. Нетрудно понять, почему предложенная Борном вероятностная интерпретация волновой функции далеко не сразу была поддержана многими физиками. Ведь она означала, что волны де-Бройля — это отнюдь не какие-то материальные волны, распространяющиеся, подобно электромагнитным волнам, в реальном трехмерном пространстве, а чисто математические «волны вероятности», для которых непригодны наглядные образы в виде изображенных на рисунках 6–8 в таблице 13 волновых цугов, волновых пакетов или волны-пилота.

Читатель. Как же следует понимать корпускулярно-волновой дуализм?

Автор. Как *потенциальную возможность микрообъекта проявлять различные свои свойства в зависимости от внешних условий и, в частности, в зависимости от условий наблюдения объекта.* Как писал В.А. Фок,

«У атомных объектов в одних условиях выступают на передний план волновые свойства, а в других — корпускулярные; возможны и такие условия, когда те и другие свойства выступают одновременно. Можно сказать, что для атомного объекта существует потенциальная возможность проявлять себя, в зависимости от вне-

шних условий, либо как частица, либо как волна, либо промежуточным образом. Именно в этой потенциальной возможности различных проявлений свойств, при-
сущих микрообъекту, и состоит дуализм волна—частица. Всякое иное, более бук-
вальное, понимание этого дуализма в виде какой-нибудь модели неправильно».

В качестве примера рассмотрим случай, когда электроны проходят че-
рез щели в интерферометре и затем регистрируются на экране-детекто-
ре. При прохождении сквозь щели электроны проявляют свои волно-
вые свойства, а при попадании на экран-детектор — корпускулярные.

Читатель. Следует ли считать, что наглядная модель микрообъекта
вообще невозможна?

Автор. Буквальная, наглядная модель микрообъекта действительно
невозможна. Такова, можно сказать, *специфика* микрообъектов. Этим
они принципиально отличаются от тех объектов, с которыми мы обы-
чно имеем дело.

Читатель. Но можно ли говорить об объекте, не представляя себе
его образа? Пусть хотя бы приблизительного, достаточно условного.

Автор. Мы говорили о попытках смоделировать корпускулярно-вол-
новой дуализм. А ведь дуализм не исчерпывает необычных свойств мик-
рообъекта. У электрона есть, например, *спин* — нечто, напоминающее
собственный момент импульса. Как если бы электрон, подобно волчку,
вращался вокруг собственной оси. Однако это «вращение» весьма нео-
бычно — оно неуничтожимо, его нельзя ни остановить, ни ускорить;
вообще не имеет смысла говорить о его угловой скорости. Использо-
уемый в аппарате квантовой механики вектор спинового момента им-
пульса электрона (вектор спина) может иметь всего два направления.
Эти направления взаимно противоположны, им отвечают два «спино-
вых состояния» электрона

Читатель. Почему бы не считать условно, что «сердцевина» в моде-
ли волны-пилота подобна вращающемуся волчку?

Автор. Вращение «сердцевины» имеет не больше смысла, чем вра-
щение материальной точки. Но продолжим разговор о необычных свой-
ствах микрообъектов. В 1925 году видный швейцарский физик-теоре-
тик, один из создателей квантовой механики *Вольфганг Паули* (1900—1958)
сформулировал для электронов принцип, называемый ныне *принципом*
запрета Паули. Согласно этому принципу, в одном и том же состоянии
может находиться один и только один электрон; никакой другой элект-
рон не может попасть в занятое состояние. Позднее выяснилось, что *по*
характеру поведения в коллективе себе подобных все микрообъекты
можно четко разбить на две группы. В одну группу входят микрообъек-
ты, обладающие полусцелым спином (заметим, что спин измеряется в

единицах $\hbar/2\pi$); например, электрон, протон, нейтрон (у них спин равен $1/2$). Микрообъекты рассматриваемой группы обнаруживают своеобразную «нетерпимость» друг к другу; в каждом конкретном состоянии может находиться не более, чем один микрообъект данного типа. Все подобные микрообъекты принято объединять общим термином *фермионы* (в честь известного итальянского физика *Энрико Ферми* (1907–1954)). Микрообъекты другой группы обнаруживают друг по отношению к другу, напротив, исключительное «чувство коллективизма»: они могут заселять одно и то же состояние в неограниченном количестве и притом с тем большей вероятностью, чем сильнее это состояние заселено микрообъектами данного типа. В эту группу входят микрообъекты без спина или с целочисленным спином; к ним относится, в частности, фотон (спин фотона равен 1). Такие микрообъекты объединяют термином *бозоны* (в честь известного индийского физика *Шатьендраната Бозе* (1894–1974)).

Читателя. Мы уже познакомились в определенной мере с электронами и фотонами. Насколько существенны «фермионность» электронов и «бозонность» фотонов?

Автор. Именно благодаря своей «фермионности» электроны заполняют уровни энергии в атомах (называемые также *электронными оболочками*, или *орбиталями*) в определенной последовательности — ведь максимально возможное число электронов на том или ином уровне равно числу состояний, соответствующих данному уровню. Если бы вдруг электроны утратили «фермионность», т. е. перестали бы подчиняться принципу запрета Паули, то во всех атомах они тут же свалились бы на самый нижний уровень — и исчезло бы многообразие химических элементов, представленное в Периодической системе элементов. Заметим далее, что именно благодаря «бозонности» фотонов происходит индуцированное (вынужденное) испускание излучения атомами: фотон инициирует переход в атоме, в результате чего рождается еще один фотон в том же самом состоянии (напомним §8.4).

У электрона в атоме, как уже отмечалось, нет траектории (орбиты). Однако у него есть определенные уровни энергии; они характеризуются двумя квантовыми числами n ($n = 1, 2, 3, \dots$) и l ($l = 0, 1, \dots, n - 1$). На рисунке 1 в таблице 15 схематически дана система энергетических уровней; эти уровни имеют обозначения (начиная с наинизшего уровня): $1s$ (для $n = 1, l = 0$), $2s$ (для $n = 2, l = 0$), $2p$ (для $n = 2, l = 1$), $3s$ (для $n = 3, l = 0$), $3p$ (для $n = 3, l = 1$), $4s$ (для $n = 4, l = 0$), $3d$ (для $n = 3, l = 2$), $4p$ (для $n = 4, l = 1$), $5s$ (для $n = 5, l = 0$), $4d$ (для $n = 4, l = 2$), $5p$ (для $n = 5, l = 1$), $6s$ (для $n = 6, l = 0$), $4f$ (для $n = 4, l = 3$), $5d$ (для $n = 5, l = 2$), $6p$ (для $n = 6, l = 1$), ... На том же рисунке в кружочках проставлено число состояний, отвечающее тому или иному уровню и, следовательно, наибольшее возможное число

Таблица 15. Периодическая система элементов и квантовая механика

3p	N	Ne	Na	Al	S	Ar
3s						
2p						
2s						
1s						
	$1s^2 2s^2 2p^3$	$1s^2 2s^2 2p^6$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$

Рис.2

6p	6	} 32
5d	10	
4f	14	
6s	2	
5p	6	} 18
4d	10	
5s	2	
4p	6	
3d	10	} 18
4s	2	
3p	6	
3s	2	
2p	6	} 8
2s	2	
1s	2	

Рис.1

$1s^i$	H 1 ⑥		He 2 ②							
$1s^2 2s^i$	Li 3 ①		Be 4 ②							
$1s^2 2s^2 2p^i$	B 5 ①	C 6 ②	N 7 ③	O 8 ④	F 9 ⑤	Ne 10 ⑥				
$1s^2 2s^2 2p^6$ $3s^i$	Na 11 ①		Mg 12 ②							
$1s^2 2s^2 2p^6$ $3s^2 3p^i$	Al 13 ①	Si 14 ②	P 15 ③	S 16 ④	Cl 17 ⑤	Ar 18 ⑥				
$1s^2 2s^2 2p^6$ $3s^2 3p^6$ $4s^i$	K 19 ①		Ca 20 ②							
$1s^2 2s^2 2p^6$ $3s^2 3p^6 4s^2$ $3d^i$	Sc 21 ①	Ti 22 ②	V 23 ③	Cr 24 ④	Mn 25 ⑤	Fe 26 ⑥	Co 27 ⑦	Ni 28 ⑧	Cu 29 ⑨	Zn 30 ⑩
$1s^2 2s^2 2p^6$ $3s^2 3p^6 4s^2$ $3d^{10} 4p^i$	Ga 31 ①		Ge 32 ②	As 33 ③	Se 34 ④	Br 35 ⑤	Kr 36 ⑥			

Рис.3

электронов, которое может находиться на данном уровне. Это число электронов образует соответствующую «электронную оболочку» (другой термин: «орбиталь») атома: $1s$ -орбиталь, $2s$ -орбиталь, $2p$ -орбиталь и т. д.

Полное количество электронов в нейтральном атоме равно его порядковому номеру в Периодической системе элементов. Рассмотрим для примера атом Na. Он имеет 11 электронов. Из них 2 электрона полностью заполняют $1s$ -орбиталь, 2 электрона полностью заполняют $2s$ -орбиталь, 6 электронов полностью заполняют $2p$ -орбиталь. Оставшийся 11-й электрон вынужден «поселиться» на $3s$ -орбитали. Распределение электронов по орбиталям в атоме Na дано на рисунке 2 в таблице 15. На том же рисунке показаны распределения электронов по уровням (орбиталям) в атомах N, Ne, Al, S, Ar. Все эти распределения называют электронными конфигурациями; они выписаны в нижней части рисунка 2 (в каждой конфигурации в правом верхнем углу стоит число электронов на соответствующей орбитали; так, $2p^3$ означает, что на $2p$ -орбитали находятся три электрона).

На рисунке 3 в таблице 15 приведена часть Периодической системы элементов (от водорода до криптона) с указанием соответствующих электронных конфигураций атомов — см. левый столбец на рисунке. В кружочках стоят значения числа i для каждого атома.

Закономерности свойств химических элементов в зависимости от их порядкового номера объясняются особенностями электронных конфигураций атомов. Это означает, что квантовая механика позволила *объяснить* Периодическую систему элементов. Свойства элементов проявляются через взаимодействия атомов, а при взаимодействии различных атомов основную роль играет то, насколько заполнены электронами внешние электронные оболочки (верхние уровни энергии).

Читатель. Поразительно: все многообразие химических элементов (а значит, и веществ) обусловлено таинственным свойством «фермионности» электрона!

Автор. А теперь подумаем: возможно ли данное свойство электрона выразить с помощью какой-либо наглядной модели? Вряд ли можно дать положительный ответ на этот вопрос.

Читатель. И все-таки почему бы не допустить, *хотя бы в принципе*, возможность каких-то модельных представлений электрона? Пусть достаточно сложных, со множеством деталей.

Автор. Принципиальная невозможность таких моделей связана с важной особенностью микрообъектов и микроявлений, о которой мы с Вами пока не говорили. Воспитанные в традициях классической физики мы привыкли полагать, что любой объект можно хотя бы мысленно расчленить на сколь угодно малые детали, что любое явление можно разбить во времени на сколь угодно короткие последовательные этапы. Одним словом, мы убеждены в *беспредельных возможностях приема анализа*. Вопрос «*что это такое?*» мы привыкли сводить к вопросу «*из чего это состоит?*»

Читатель. А что в этом плохого?

Автор. Дело в том, что квантовая физика показала *ограниченность* такой точки зрения. Характерная особенность микрообъектов и микро-явлений состоит в том, что они *принципиально не допускают безграничной детализации ни в пространстве, ни во времени*. Это весьма глубокое обстоятельство настойчиво подчеркивал Нильс Бор. Он писал: «С открытием Планком *элементарного кванта действия* началась новая эпоха в физических науках. Это открытие обнаружило свойственную атомным процессам черту *цельности*, идущую гораздо дальше старой идеи об ограниченной делимости материи. Стало ясно, что свойственное классическим теориям наглядное картинное описание представляет собой идеализацию». Вот эта подчеркиваемая Бором «черта цельности» и заставляет нас воздержаться от соблазна поставить вопрос «из чего состоит электрон?» Кроме того, как мы уже отмечали ранее, для микрообъектов характерна *принципиально неуничтожимая связь с окружающим миром*, делающая бессмысленным само понятие «изолированный микрообъект». Эта связь обуславливает зависимость ряда свойств микрообъекта от конкретных внешних условий. Такие свойства мы рассматриваем как *потенциальные возможности*, реализуемые в зависимости от внешних условий. Понятно, что эти потенциальные возможности нельзя выразить посредством определенной наглядной модели, сколь бы сложна и изощрена она ни была.

Читатель. Вы привели веские доводы. Однако нет ли тут *субъективности*? Если все зависит от внешних условий, в частности от условий наблюдения, то невольно возникает мысль: микрообъект не есть что-то объективное, а есть нечто субъективное, зависящее от того, как на него «посмотреть».

Автор. Не надо забывать, что электрон имеет целый набор совершенно определенных характеристик. Он имеет определенную массу покоя, электрический заряд, спин, относится к фермионам. А вот наглядной модели он не имеет. Однако, отказываясь от нее, квантовая механика вовсе не приносит объективность в жертву субъективности. Просто надо признать, что электрон — весьма специфический физический объект, который *в зависимости от внешних условий* реализует разные стороны своей сущности. Надо иметь в виду, что эти стороны *объективно* существовали еще до рождения наблюдателя.

Читатель. И все же роль *наблюдателя* оказывается здесь в определенном смысле решающей.

Автор. В этом Вы правы. Чтобы, например, измерить импульс электрона, наблюдатель организует эксперимент таким образом, что при этом

пространственные координаты электрона становятся неопределенными. Измеряя координаты, он ставит эксперимент, в котором электрон «превращается» в объект с неопределенным импульсом. Но при чем здесь субъективизм? Соотношения неопределенностей — *объективный закон*. Наблюдатель и экспериментальная установка — *объективные факторы*. Воздействие условий эксперимента на измеряемый объект — *тоже объективный фактор*. Просто мы привыкли мысленно помешать наблюдателя где-то вне изучаемой ими ситуации, как бы над этой ситуацией. Об этом хорошо сказал Макс Борн:

«Предполагается, что внешний мир (объект естествознания), с одной стороны, и мы (наблюдающие, мыслящие и вычисляющие субъекты), с другой стороны, полностью отделены друг от друга и что существует способ исследовать явления, не вмешиваясь в их течение. Такова философия науки, при которой выросли мы, люди старого поколения».

Квантовая физика потребовала изменить точку зрения. Она показала, что человек — часть природы, неразрывно связанная с ней, что, исследуя природу, человек *неизбежно изменяет ее*, что, изучая явления, он *неизбежно вмешивается в их течение*.

Читателя. Не рискует ли квантовая физика, отвергая наглядные модели, утратить в какой-то степени материальную основу? Не останутся ли в итоге лишь уравнения и абстрактные математические символы?

Автор. Не будем становиться на точку зрения: либо наглядные модели, либо математические абстракции. Эта точка зрения метафизична. Квантовая физика подходит к подобным вопросам достаточно гибко, диалектично.

Читателя. Как это надо понимать?

Автор. Квантовая физика достаточно широко использует модели при условии, что все они *условны, относительны*. Каждая из них отражает какую-то сторону сущности микрообъекта. Рассматривая переходы электрона с одного уровня энергии на другой, мы, не смущаясь, изображаем его в виде некой корпускулы (например, в виде шарика). Хорошим примером условного моделирования служит также образ электронного облака, используемый для электрона в атоме. Кроме того, заметим, квантовая физика использует *на равноправных началах* и условные модели, и математические абстракции. Подчеркивая большое *эвристическое* значение, какое математика приобретает в квантовой физике и какого она раньше (в эпоху господства наглядных представлений) не имела, академик *Сергей Иванович Вавилов* (1891–1951) писал: «Для наглядной модельной интерпретации картины не хватает привычных образов и понятий, но логика с ее необъятной широтой, воплощенная в математические

формы, остается в силе, устанавливая порядок связи в новом, непонятном мире и открывая возможности физических предсказаний».

Читатель. По-видимому, затруднения с интерпретацией микрообъектов связаны с тем, что на уровне микроявлений нам действительно не хватает образов и понятий. Ведь мы смотрим в «микромир» из нашего обычного мира, применяя в экспериментах макроскопические приборы.

Автор. Следует помнить об этом и с осторожностью применять привычные представления и понятия, обсуждая вопрос о том, что такое есть микрообъект.

Читатель. Как я понимаю, поиски наглядной модели микрообъекта — это по сути дела попытка втиснуть идеи квантовой физики в рамки классической физики.

8.10 РЕМИНИСЦЕНЦИЯ: ГЕТЕ ПРОТИВ НЬЮТОНА

Великий немецкий поэт *Иоганн Вольфганг Гете* (1749–1832) был также видным естествоиспытателем. В частности, его интересовала теория возникновения цвета; он написал книгу «Учение о цвете». В свое время теорию цвета создал *Исаак Ньютон*, выполнивший блестящий комплекс основательно продуманных оптических экспериментов (мы имеем в виду ньютоновы «Лекции по оптике», вторая часть которых называется «О происхождении цветов»). Гете был не согласен с выводами Ньютона, касающимися разложения солнечного света на цвета радуги. Не попытавшись повторить опыты Ньютона и не вникнув в их суть, Гете с ходу отверг ньютоновскую теорию цвета. Он заявлял: «Утверждения Ньютона — чудовищное предположение. Не может быть, чтобы самый прозрачный, самый чистый цвет — белый — оказался смесью цветных лучей». Как мы, живущие в XXI столетии, должны воспринимать эти нападки Гете на Ньютона? Нужно ли сегодня вспоминать о них? Не следует ли считать их всего лишь капризом гения?

Но нет, это не был «каприз гения». По сути дела, мы встречаемся здесь с *гениальным предвидением грядущих проблем в естествознании*. И, конечно же, это предвидение не могло найти понимания в XIX веке.

Гете и Ньютон были разными людьми по складу мышления; они по-разному относились к тому, как надо исследовать природу. Ньютон — ученый с необычайно развитым аналитическим умом, стремящийся каждый шаг вперед перепроверить и подкрепить опытом и расчетами.

Это дотошный исследователь, требовавший от себя и от других «не смешивать домыслы с достоверностями». Проводя оптические исследования, он ставил задачу «не объяснять свойства света гипотезами, но изложить и доказать их опытами и рассуждениями». В отличие от Ньютона, Гете не был приверженцем аналитического подхода; он предпочитал воспринимать мир как целое, к экспериментам и вычислениям относился скептически. «Природа немеет на пытке», — любил говорить Гете. Он утверждал, что исследованный Ньютоном свет — это уже не тот свет, с каким мы имеем дело в природе, а свет, «замученный разного рода орудиями пытки — щелями, призмами, линзами». Не без сарказма Гете призывал:

Друзья, избегайте темной комнаты,
Где вам искажают свет
И самым жалким образом
Склоняются перед искаженными образами.

Конечно, Гете был неправ, нападая на учение Ньютона. И тем не менее сегодня нельзя отмахнуться от замечаний Гете, нельзя отнестись к ним как к какой-то причуде. Потому что независимо от намерений самого Гете мы усматриваем в его точке зрения нечто весьма важное. «В трактате Гете о цвете, — отмечал академик *Владимир Иванович Вернадский* (1863–1945), — современный мыслящий человек может найти для себя неожиданное и важное, о чем Гете, возможно, не думал». Что же именно? По выражению академика *Леонида Исааковича Мандельштама* (1879–1944), здесь можно видеть «наивное и одностороннее предвосхищение современной точки зрения на роль измерительной аппаратуры».

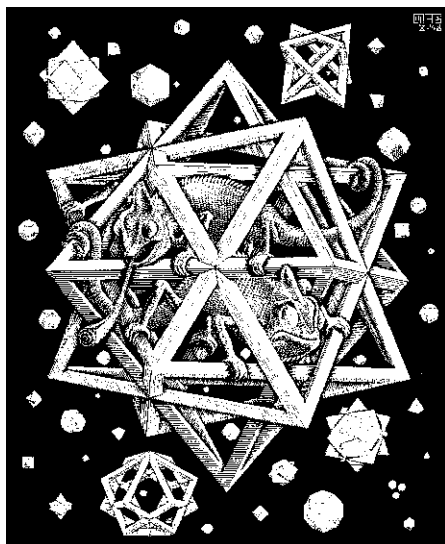
Квантовая физика доказала, что, выполняя те или иные измерения с микрообъектами, мы неизбежно и притом непредсказуемо *искажаем то, что измеряем*. Исследуя природу на уровне микроявлений, экспериментатор в самом деле искажает ее. Квантовая физика показала, что в общем случае *нельзя изучать явления, не вмешиваясь в их течение* и не внося при этом случайных искажений.

Гениальное предвосхищение этого вывода и есть то рациональное зерно в позиции Гете, мимо которого мы не можем сегодня пройти. Конечно, критика Гете была направлена, как говорится, не по адресу. Она ни в какой мере не может принизить огромную роль Ньютона в научном познании природы и, в частности, природы света. Вместе с тем затронутые в этой критике вопросы, касающиеся взаимоотношений измерительного прибора и измеряемого объекта, весьма интересны

и актуальны. Пожалуй, лучше всего эти вопросы Гете поставил не в «Учении о цвете», а в своем бессмертном «Фаусте»:

Во всем подслушать жизнь стремясь,
Спешат явления обездушить.
Забыв, что если в них нарушить
Одушевляющую связь,
То больше нечего и слушать.

Именно против этого чрезмерно дотошного «подслушивания во всем» и выступает сегодня квантовая физика. Она утверждает, что принципиально нельзя безгранично детализировать явления во времени или объекты в пространстве — рано или поздно такая детализация должна привести к разрушению самого явления (объекта). Иначе говоря, нельзя беспредельно применять метод анализа из-за опасности нарушить «одушевляющую связь», после чего уже «нечего и слушать».



КВАНТОВАЯ ФИЗИКА: НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Сегодня квантовая теория привела нас к более глубокому пониманию: она установила более тесную связь между статистикой и основами физики. Это является событием в истории человеческого мышления, значение которого выходит за пределы самой науки.

Макс Борн

Квантовая теория раскрыла новые и существенные черты нашей реальности. Прерывность встала на место непрерывности. Вместо динамических законов появились вероятностные законы.

А. Эйнштейн, Л. Инфельд
«Эволюция физики»

9.1 МИКРООБЪЕКТ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Напомним известный опыт по *интерференции света*. На рисунке 1 в таблице 16 приведена схема простейшего интерферометра: s — источ-

ник монохроматического света, 1 — экран с щелями A и B , 2 — экран-детектор, на котором регистрируется распределение интенсивности света. Он описывается кривой $I(x)$, имеющей интерференционный вид. Как известно, объяснение интерференции света на основе волновых представлений было дано еще в XIX веке *Томасом Юнгом*. С тех пор опыт, изображенный на данном рисунке, называют *опытом Юнга*.

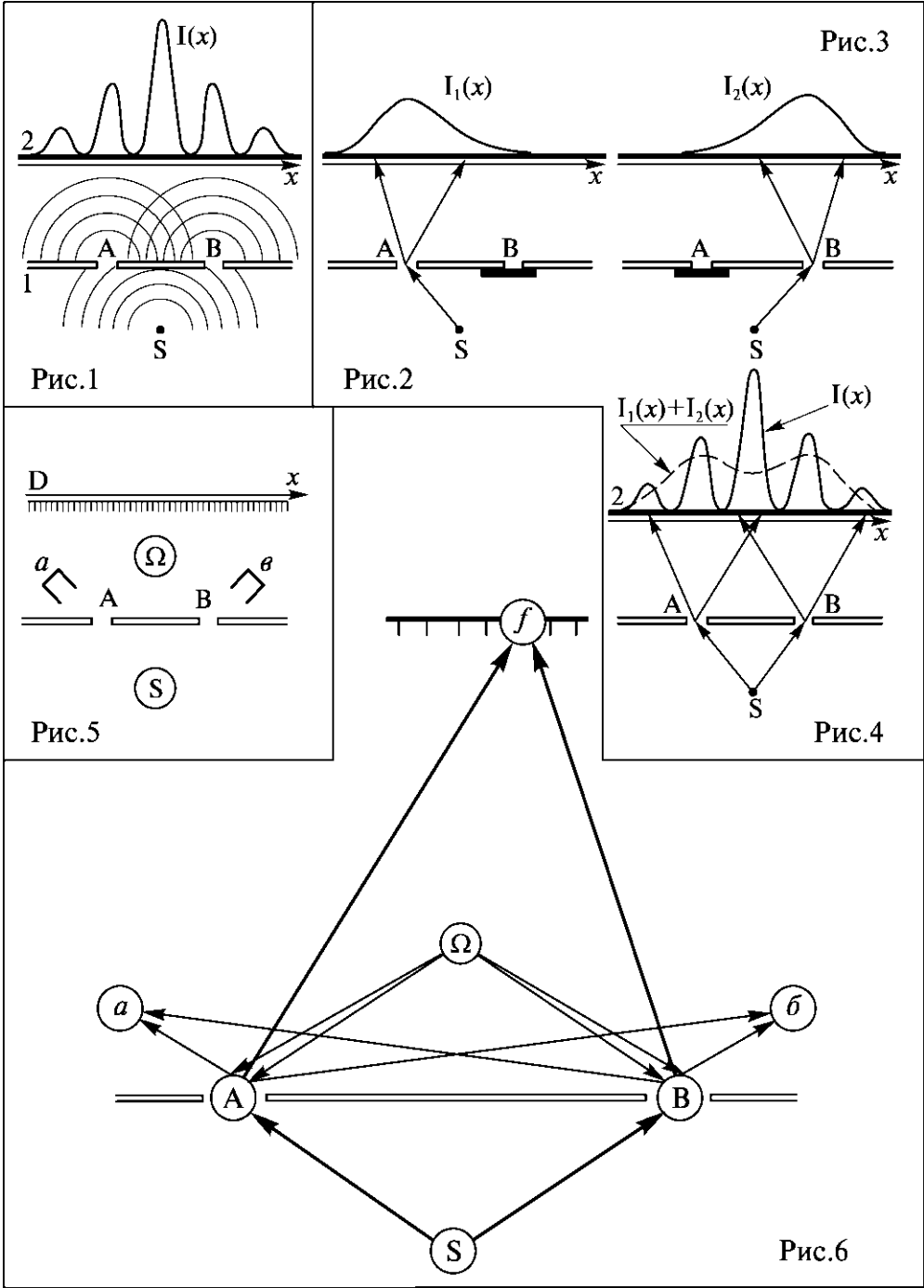
Казалось бы, какое отношение имеет к квантовой физике давно открытое и объясненное явление интерференции света? Оказывается, самое прямое.

Будем постепенно уменьшать интенсивность света от источника. Освещенность экрана-детектора будет, естественно, уменьшаться. Но интерференционный вид кривой $I(x)$ сохранится. Увеличивая время экспозиции можно получить на экране-фотопластинке интерференционную кривую $I(x)$ при сколь угодно малой интенсивности светового пучка — даже тогда, когда через интерферометр проходят уже не световые волны, а фактически отдельные фотоны. Распределение попаданий фотонов дает на фотодетекторе ту же самую интерференционную картину.

Интерференция наблюдается и тогда, когда в S находится источник моноэнергетических электронов. При этом можно опять-таки сколь угодно уменьшать интенсивность пучка. Опыты с другими микрообъектами дают аналогичные результаты. *Интерференция наблюдается для всех микрообъектов* — фотонов, электронов, нейтронов и т. д. При этом, как показывает опыт, интерференция должна объясняться не как свойство коллектива микрообъектов, а как свойство *отдельного* микрообъекта.

Как же ведет себя в интерферометре микрообъект? Пусть это будет электрон. Закроем щель B ; в этом случае на экране возникает распределение, описываемое кривой $I_1(x)$ (см. рис. 2 в таблице 16). Откроем щель B , но закроем A ; возникнет распределение $I_2(x)$ (см. рис. 3). При обеих открытых щелях возникает не суммарное распределение $I_1(x) + I_2(x)$, а интерференционное распределение $I(x)$ (см. рис. 4). Если полагать, что каждый электрон проходит всякий раз через какую-то *одну* из щелей (либо через A , либо через B), то образование интерференционного распределения $I(x)$ вынуждает нас сделать довольно странное заключение. Получается, что, проходя через одну из щелей, электрон неким образом «ощущает» при этом наличие другой щели. Ведь в противном случае каждому электрону, проходящему через ту или иную щель, было бы безразлично, открыта или закрыта соседняя щель, и тогда распределение при обеих открытых щелях должно было бы описываться суммарной кривой $I_1(x) + I_2(x)$.

Таблица 16. Микрообъект в двухщелевом интерферометре



Но каким образом электрон, проходя через одну щель, может «ощущать» при этом другую щель? Здесь пригодилась бы модель волны-пилота, изображенная на рисунке 8 в таблице 13 («сердцевина» проходит через одну из щелей, а ψ -поле проходит сразу через обе щели). Однако никакого материального ψ -поля не существует, вследствие чего данная модель оказывается несостоятельной. Предположение, что электрон (частица с определенной массой и определенным электрическим зарядом) проходит каким-то образом *сразу через обе щели*, представляется совсем нелепым. В этой тупиковой ситуации обратимся снова к опыту и попробуем *подглядеть*, как именно проходит электрон через экран с щелями.

Поместим вблизи щелей *A* и *B* источник света Ω и фотоприемники *a* и *b* — см. рис. 5 в таблице 16. Источник света и фотоприемники предназначены для подглядывания за тем, как именно проходят электроны через экран с щелями (фотоприемники регистрируют свет, рассеянный электроном вблизи той или иной щели). Если электрон каким-то образом проходит *сразу через обе щели*, то должны срабатывать *одновременно* оба фотоприемника. Если же электрон проходит через одну из щелей, то сработает лишь соответствующий фотоприемник.

Итак, включаем источник света и наблюдаем за фотоприемниками. Предварительно позаботимся о том, чтобы электроны проходили через экран с щелями поодиночке (источник электронов *s* должен испускать очередной электрон уже после того, как предыдущий достиг экран-детектора). Опыт показывает, что всякий раз срабатывает только один фотоприемник — либо *a*, либо *b* — и *никогда не срабатывают оба фотоприемника одновременно*. Значит, электрон проходит не через обе щели сразу, а только через одну из них. При этом можно всякий раз указать, через какую именно щель прошел тот или иной электрон.

Но не будем торопиться с выводами и доведем опыт до конца — получим достаточно большое число попаданий электронов на экран-детекторе и посмотрим, как распределятся эти попадания. Вот тут-то нас и ожидает сюрприз! На экране обнаруживается не интерференционная кривая $I(x)$, а суммарная кривая $I_1(x) + I_2(x)$. Повторим опыт, выключив источник света (и тем самым прекратив подглядывание за прохождением электронов через щели). В этом случае опять возникает интерференционное распределение $I(x)$.

Получается, что при выключенном источнике света интерференция есть, а при включенном ее нет. *Как только начинается контролирование процесса прохождения электронов через экран с щелями, интерференция исчезает*. Можно сказать, что наблюдение за поведением электронов в интерферометре *разрушает интерференцию*.

Иначе говоря, если опыт ставится таким образом, чтобы всякий раз было ясно, через какую именно щель проходит электрон, интерференции нет. Однако интерференция возникает, если опыт ставится так, что неизвестно, где именно прошел электрон.

9.2 РАЗЛИЧИМЫЕ И НЕРАЗЛИЧИМЫЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ; СЛОЖЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И СЛОЖЕНИЕ АМПЛИТУД ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Будем рассматривать переход микрообъекта из некоторого начального состояния s в некоторое конечное состояние f . Полагаем, что конечные состояния образуют не непрерывный, а дискретный набор — в противном случае нам пришлось бы рассматривать не вероятность перехода из s в f , а плотность вероятности. Обозначим *вероятность перехода* из s в f через $w(s \rightarrow f)$ и введем новое понятие — *амплитуду вероятности перехода* $\psi(s \rightarrow f)$, используя соотношение:

$$w(s \rightarrow f) = |\psi(s \rightarrow f)|^2. \quad (1)$$

Амплитуда вероятности есть величина, квадрат модуля которой равен вероятности.

НЕЗАПЛАНИРОВАННЫЙ ДИАЛОГ

Читатель. Но позвольте, введенная Вами амплитуда вероятности ψ очень похожа на *волновую функцию*! Ведь квадрат модуля волновой функции тоже есть вероятность.

Автор. Вы правы. *Амплитуда и волновая функция — это, строго говоря, одно и то же.* Позднее это будет показано.

Читатель. Но, может быть, с самого начала следует использовать знакомый термин «волновая функция»?

Автор. С самого начала этого делать не хотелось бы. Во-первых, мы рассматриваем *вероятность перехода*, поэтому естественно говорить об амплитуде этой вероятности. Ни о каких «волнах», собственно говоря, речи здесь не идет. Во-вторых, если Вы помните, волновая функция описывает *состояние* микрообъекта. Здесь же рассматривается переход микрообъекта из одного состояния в другое состояние (из состояния s в состояние f).

Читатель. Вот это очень существенно!

Автор. Как раз тут Вы ошибаетесь. Вспомните: квадрат модуля волновой функции определяет вероятность обнаружить микрообъект в со-

ответствующем состоянии. Нетрудно показать, что это утверждение можно перевести на язык вероятностей переходов. Это будет показано, но только немного позднее. А пока забудем на время о волновой функции — будем говорить о вероятностях переходов и об их амплитудах.

Предположим, что есть несколько вариантов перехода микрообъекта из состояния s в состояние f (несколько альтернатив). Им отвечают амплитуды вероятностей:

$$\psi_1(s \rightarrow f), \psi_2(s \rightarrow f), \dots, \psi_i(s \rightarrow f), \dots$$

Рассмотрим два принципиально различных случая.

Первый случай: *альтернативы различимы* — известно, какой из вариантов перехода реализуется в том или ином опыте. В данном случае вероятность перехода $|\psi(s \rightarrow f)|^2$ есть сумма вероятностей переходов, отвечающих разным альтернативам:

$$|\psi(s \rightarrow f)|^2 = \sum_i |\psi_i(s \rightarrow f)|^2. \quad (2)$$

Второй случай: *альтернативы неразличимы* — неизвестно, какой из вариантов перехода реализуется в том или ином опыте. Существенно, что в этом случае *надо складывать не вероятности альтернативных переходов, а амплитуды вероятностей*:

$$\psi(s \rightarrow f) = \sum_i \psi_i(s \rightarrow f). \quad (3)$$

В данном случае:

$$|\psi(s \rightarrow f)|^2 = \left| \sum_i \psi_i(s \rightarrow f) \right|^2. \quad (4)$$

Случай неразличимых альтернатив специфичен для квантовой физики. В классической физике он принципиально невозможен — там всегда можно, в принципе, проследить за любым перемещением объекта. Иное дело микрообъект, скажем, электрон, — он, строго говоря, не имеет траектории, он тождествен с любым другим электроном (два электрона похожи друг на друга в значительно большей мере, чем вошедшие в поговорку две капли воды; замену одного электрона другим принципиально нельзя обнаружить); кроме того, электрон может совершать квантовые скачки между уровнями энергии, и в этих условиях существование действительно неразличимых альтернатив того или иного перехода оказывается возможным.

Соотношение (4) можно переписать в виде:

$$|\psi(s \rightarrow f)|^2 = \sum_i |\psi_i(s \rightarrow f)|^2 + \Delta(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i, \dots). \quad (5)$$

Здесь через Δ обозначен набор слагаемых перекрестного типа (для вещественных амплитуд это есть набор $2\psi_1\psi_2 + 2\psi_1\psi_3 + 2\psi_2\psi_3 + \dots$). Именно Δ обуславливает интерференционный вид кривой, описывающей распределение попаданий электрона на экране-детекторе. В связи с этим говорят, что в случае, когда альтернативы неразличимы, *происходит интерференция амплитуд*, отвечающих разным альтернативам. Фактически под интерференцией амплитуд следует понимать *сложение амплитуд* (см. соотношение (3)).

Предположим, что имеются *две* альтернативы (амплитуды ψ_1 и ψ_2). Альтернативы неразличимы. Если амплитуды — вещественные числа, то $|\psi|^2 = (\psi_1 + \psi_2)(\psi_1 + \psi_2) = \psi_1^2 + \psi_2^2 + 2\psi_1\psi_2$.

В этом случае: $\Delta = 2\psi_1\psi_2$.

Если амплитуды — комплексные числа, то $|\psi|^2 = (\psi_1 + \psi_2)(\psi_1^* + \psi_2^*)$.

В этом случае: $\Delta = \psi_1\psi_2^* + \psi_1^*\psi_2$.

Знак $*$ означает комплексное сопряжение (если $\psi = \gamma + i\xi$, то $\psi^* = \gamma - i\xi$, где i — мнимая единица).

9.3 ОБСУЖДЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

9.3.1. Общий случай. Учитывая выражаемые соотношениями (2) и (3) правила, обратимся к опыту, описанному в § 9.7 — см. рис. 5 и рис. 6 в таблице 16. Чтобы иметь дело с вероятностью перехода электрона из s в f (а не с плотностью вероятности), разобьем экран-детектор D по оси x на маленькие отрезочки и будем рассматривать в качестве конечных состояний электрона состояния f , отвечающие регистрации электрона в пределах того или иного отрезочка. Распределение попаданий на экране-детекторе будет в этом случае иметь вид ступенчатой линии, которую следует сгладить — аппроксимировать плавной кривой.

Амплитуду вероятности перехода из s в f с прохождением электрона через щель A обозначим через $\psi_A(s \rightarrow f)$, а амплитуду с прохождением электрона через щель B обозначим через $\psi_B(s \rightarrow f)$. Фотон, испущенный источником света Ω , может рассеяться на электроны, проходящем через щель A , и попасть затем в фотоприемник a (амплитуду вероятности такого перехода фотона обозначим через $\phi(\Omega \rightarrow A \rightarrow a)$ или в фото-

приемник b (амплитуда $\varphi(\Omega \rightarrow A \rightarrow b)$). Конечно, фотон после рассеяния на электроне (если рассеяние произойдет) может не попасть ни в тот, ни в другой фотоприемник; такие электроны нас интересовать не будут. Введем также амплитуды $\varphi(\Omega \rightarrow B \rightarrow a)$ и $\varphi(\Omega \rightarrow B \rightarrow b)$; они относятся к фотонам, которые рассеялись на электроне, проходящем через щель B и которые затем оказались зарегистрированными фотоприемником a или фотоприемником b соответственно. Исходя из соображений симметрии, будем полагать, что

$$\varphi(\Omega \rightarrow A \rightarrow a) = \varphi(\Omega \rightarrow B \rightarrow b) \equiv \varphi_1,$$

$$\varphi(\Omega \rightarrow A \rightarrow b) = \varphi(\Omega \rightarrow B \rightarrow a) \equiv \varphi_2.$$

Мы обозначили здесь через φ_1 амплитуду вероятности фотону рассеяться в *ближний* к соответствующей щели фотоприемник (фотон, рассеянный вблизи щели A , попадает в фотоприемник a ; фотон, рассеянный вблизи щели B , попадает в фотоприемник b), а через φ_2 обозначена амплитуда вероятности фотону рассеяться в *дальний* от соответствующей щели фотоприемник (от щели A — в фотоприемник b ; от щели B — в фотоприемник a).

Пусть электрон совершает переход из s в f и одновременно фотон рассеивается в фотоприемник a . В данном случае возможны две альтернативы: 1) электрон проходит через щель A , фотон рассеивается в ближний к этой щели фотоприемник (это как раз и есть фотоприемник a); 2) электрон проходит через щель B , фотон рассеивается в дальний от этой щели фотоприемник (фотоприемник a). Амплитуды двойных переходов: $\Psi_A(s \rightarrow f) \cdot \varphi_1 \equiv \Psi_A$ для первой альтернативы и $\Psi_B(s \rightarrow f) \cdot \varphi_2 \equiv \Psi_B$ для второй альтернативы. Очевидно, что амплитуда для двух независимых переходов равна произведению амплитуд для одного и для другого перехода. Нам неизвестно, через какую из двух щелей пройдет электрон; поэтому альтернативы с амплитудами Ψ_A и Ψ_B следует рассматривать как неразличимые. Следовательно, амплитуда Ψ вероятности того, что электрон попадет в состояние f , а фотон в фотоприемник a , должна определяться суммой амплитуд Ψ_A и Ψ_B :

$$\Psi = \Psi_A + \Psi_B = \Psi_A(s \rightarrow f)\varphi_1 + \Psi_B(s \rightarrow f)\varphi_2. \quad (*)$$

Теперь предположим, что электрон совершает переход из s в f , и одновременно фотон рассеивается в фотоприемник b . И в этом случае возможны две альтернативы: 1) электрон проходит через щель A , фотон рассеивается в дальний от щели фотоприемник (это как раз и есть

фотоприемник b); 2) электрон проходит через щель B , фотон рассеивается в ближний к щели фотоприемник. Амплитуды двойных переходов: $\psi_A(s \rightarrow f)\varphi_2 \equiv \Phi_A$ для первой альтернативы и $\psi_B(s \rightarrow f)\varphi_1 \equiv \Phi_B$ для второй альтернативы. Альтернативы неразличимы, поскольку неизвестно, через какую из двух щелей пройдет электрон; поэтому амплитуда Φ вероятности того, что электрон попадет в состояние f , а фотон в фотоприемник b , будет определяться суммой амплитуд Φ_A и Φ_B :

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_B = \psi_A(s \rightarrow f)\varphi_2 + \psi_B(s \rightarrow f)\varphi_1. \quad (**)$$

Нам требуется найти вероятность электронного перехода $s \rightarrow f$ независимо от того, где будет зарегистрирован рассеянный электроном фотон — в фотоприемнике a или в фотоприемнике b . Поскольку оба варианта (попадание фотона в a или в b) различимы, то искомая вероятность $w(s \rightarrow f)$ должна определяться суммой вероятностей $|\Psi|^2$ и $|\Phi|^2$:

$$w(s \rightarrow f) = |\Psi|^2 + |\Phi|^2.$$

Подставляя сюда (*) и (**), получаем

$$w(s \rightarrow f) = |\psi_A(s \rightarrow f)\varphi_1 + \psi_B(s \rightarrow f)\varphi_2|^2 + |\psi_A(s \rightarrow f)\varphi_2 + \psi_B(s \rightarrow f)\varphi_1|^2. \quad (6)$$

9.3.2. Случай полной неразличимости альтернатив. Предположим, что фотоны с *равной вероятностью* рассеиваются как в ближний к щели, так и в дальний от нее фотоприемник и, следовательно, *не контролируют* прохождение электронов через экран с щелями. В этом случае:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi, \quad |\varphi|^2 = 1/2. \quad (***)$$

Подставляя (***) в (6), находим:

$$\begin{aligned} w(s \rightarrow f) &= 2|\varphi|^2 |\psi_A(s \rightarrow f) + \psi_B(s \rightarrow f)|^2 = \\ &= |\psi_A(s \rightarrow f) + \psi_B(s \rightarrow f)|^2. \end{aligned} \quad (7)$$

9.3.3. Случай полной различимости альтернатив. Частичная различимость. Предположим теперь, что фотоны могут рассеиваться в ближний к щели фотоприемник и не могут рассеиваться в дальний фотоприемник. В этом случае:

$$\varphi_2 = 0; \quad |\varphi_1|^2 = 1. \quad (****)$$

Подставляя (****) в (6), находим:

$$\begin{aligned} w(s \rightarrow f) &= 2|\varphi_1|^2 \left(|\psi_A(s \rightarrow f)|^2 + |\psi_B(s \rightarrow f)|^2 \right) = \\ &= |\psi_A(s \rightarrow f)|^2 + |\psi_B(s \rightarrow f)|^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Обратим внимание на одну тонкость. Наряду со случаем полной различимости альтернатив (когда фотон не может рассеяться в дальний от соответствующей щели фотоприемник) возможен непрерывный набор ситуаций, когда вероятность фотону рассеяться в дальний фотоприемник отлична от нуля, но при этом меньше вероятности рассеяться в ближний фотоприемник. Все подобные ситуации содержатся в (6) и соответствуют *частичной различимости* альтернатив. При уменьшении длины волны света, контролирующего прохождение электронов через интерферометр, отношение $|\varphi_2|^2/|\varphi_1|^2$ уменьшается, приближаясь к нулю, — *степень различимости альтернатив возрастает*. При увеличении длины волны света отношение $|\varphi_2|^2/|\varphi_1|^2$ увеличивается, приближаясь к единице, — *степень различимости альтернатив уменьшается*. Степень различимости будет тем больше, чем сильнее будет выражена величина Δ , определяемая соотношением:

$$\begin{aligned} \Delta &= \left[|\psi_A(s \rightarrow f)\varphi_1 + \psi_B(s \rightarrow f)\varphi_2|^2 + |\psi_A(s \rightarrow f)\varphi_2 + \psi_B(s \rightarrow f)\varphi_1|^2 \right] - \\ &\quad - \left[|\psi_A(s \rightarrow f)|^2 + |\psi_B(s \rightarrow f)|^2 \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Величина Δ «отвечает» за интерференционный вид кривой распределения попаданий на экране-детекторе. В случае полной неразличимости она выражена наиболее ярко; в случае же полной различимости величина Δ обращается в нуль — интерференция амплитуд полностью исчезает.

Теперь можно уточнить сделанные ранее замечания. *Теорема сложения вероятностей работает, когда альтернативы полностью различимы. Она не работает в случае частичной различимости и тем более полной неразличимости. Во всех этих случаях наблюдается интерференция амплитуд вероятностей.*

Итак, мы видим, что контролирование прохождения электронов через щели, делая альтернативы в той или иной мере различимыми, приводит к большему или меньшему разрушению интерференции. Подчеркнем в заключение принципиальное обстоятельство: разрушение интерференции является следствием действий, предпринимаемых в измерительном акте, который в данном случае решает задачу — выяснить,

через какую именно щель прошел тот или иной электрон. Коротко говоря, *измерение (наблюдение) в той или иной мере разрушает интерференцию*. Мы убеждаемся, что роль наблюдателя в квантовой физике действительно весьма специфична — *наблюдая микроявления, производя над ними измерения, он тем самым в той или иной мере изменяет характер самих микроявлений*. Поистине «природа немеет на пытке», как говаривал великий Гете.

9.4 ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ КАК АМПЛИТУДА ВЕРОЯТНОСТИ

Соотношения неопределенностей Гейзенберга, с которыми мы познакомились в теме 8, предполагают, что величины, характеризующие микрообъект, разбиваются на наборы *одновременно измеримых величин* — так называемые *полные наборы* величин. Пример одного полного набора — координаты x, y, z ; пример другого полного набора — составляющие импульса p_x, p_y, p_z . Величины, входящие в тот или иной полный набор, одновременно измеримы, чего нельзя сказать о величинах, входящих в разные полные наборы. В § 8.6 мы отмечали, что состояние микрообъекта задается волновой функцией, представляющей собой *параметрическую функцию*, где *параметр* — это величины, которые в данном состоянии могут принимать *определенные* значения, а *аргумент* — величины, определяемые в данном состоянии лишь с некоторой *вероятностью* (напомним предложенную Максом Борном вероятностную интерпретацию волновой функции; см. § 8.7). В качестве примера такой функции приводилась функция (20): $\varphi_{p_x, p_y, p_z}(x, y, z)$. Можно сказать, что волновая функция — это параметрическая функция, у которой *параметрами являются величины одного полного набора, а аргументами — величины другого полного набора*.

В общем случае представим волновую функцию в виде $\psi_\alpha(\beta)$. Принято говорить, что функция $\psi_\alpha(\beta)$ есть *собственная функция величин α -набора, заданная в представлении величин β -набора* (в β -представлении). Задание волновой функции $\psi_\alpha(\beta)$ означает точное задание величин α -набора и вероятностное задание величин β -набора. Если β -величины дискретны, то $|\psi_\alpha(\beta)|^2$ есть вероятность того, что микрообъект, находящийся в некотором α -состоянии (состоянии с определенным значением α), может быть обнаружен также в том или ином β -состоянии (будет иметь то или иное значение β). Если β -величины непрерывны, то $|\psi_\alpha(\beta)|^2$ есть не вероятность, а *плотность вероятности*. Для простоты будем полагать ниже, что β -величины дискретны.

Итак, микрообъект находится в некотором α -состоянии, т. е. задается соответствующей волновой функцией $\psi_\alpha(\beta)$. С вероятностью $|\psi_\alpha(\beta)|^2$ он может быть обнаружен в одном из β -состояний. Акт обнаружения микрообъекта есть некий *измерительный акт*, в результате которого микрообъект, *находившийся в α -состоянии, оказался обнаруженным в том или ином β -состоянии*. Фактически речь идет о *переходе* микрообъекта из состояния α в состояние β , причем вероятность такого перехода равна $|\psi_\alpha(\beta)|^2$. Мы видим, таким образом, что предложенная Борном вероятностная интерпретация волновой функции «превращает», по сути дела, волновую функцию в амплитуду вероятности.

НЕЗАПЛАНИРОВАННЫЙ ДИАЛОГ

Читатель. Как я понимаю, здесь речь идет о переходе микрообъекта из некоторого состояния с определенными значениями величин одного полного набора в одно из состояний с определенными значениями величин другого полного набора.

Автор. Именно так.

Читатель. Один полный набор, другой, третий...

Автор. Вас что-то смущает?

Читатель. Да, смущает. Пусть $\psi_\alpha(\beta)$ задает α -состояние в представлении величин β -набора. И пусть γ -набор — еще один полный набор, а функция $\psi_\alpha(\gamma)$ задает α -состояние в представлении величин γ -набора. Наверное, между функциями $\psi_\alpha(\beta)$ и $\psi_\alpha(\gamma)$ должна быть какая-то связь? Ведь эти функции задают в разных представлениях *одно и то же* состояние.

Автор. Такая связь действительно существует. В предположении дискретного изменения β -величин она имеет вид:

$$\boxed{\varphi_\alpha(\gamma) = \sum_i \psi_\alpha(\beta_i) \xi_{\beta_i}(\gamma),} \quad (10)$$

где $\xi_{\beta_i}(\gamma)$ — собственная функция величин β -набора, заданная в γ -представлении.

Соотношение (10) выражает так называемый *принцип суперпозиции* состояний. Он играет в квантовой физике принципиально важную роль.

Читатель. Как говорится, час от часу не легче. Ваши пояснения не очень-то проясняют ситуацию. Скорее, усложняют ее. К загадочным соотношениям неопределенностей теперь добавился не менее загадочный принцип суперпозиции состояний.

Автор. Этот принцип органически связан с соотношениями неопределенностей. В определенном смысле он «компенсирует» негативное содержание соотношений неопределенностей, которые требуют отказа от одновременной измеримости тех или иных физических величин.

9.5 СУПЕРПОЗИЦИЯ СОСТОЯНИЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МИКРООБЪЕКТА

Перепишем соотношение (10), выражающее принцип суперпозиции состояний, в более простом виде:

$$\boxed{\varphi_{\alpha} = \sum_i \psi_{\alpha}(\beta_i) \xi_{\beta_i}}. \quad (11)$$

Здесь φ_{α} — некоторое α -состояние, ξ_{β_i} — различные состояния, соответствующие полному β -набору. Соотношение (11) означает, что *состояние микрообъекта, отвечающее некоторому полному набору величин, может быть «разложено» по совокупности состояний микрообъекта, отвечающих другому полному набору*. В данном случае α -состояние (функция φ_{α}) «разложено» по совокупности β -состояний, представляемых функциями ξ_{β_i} . При этом $\psi_{\alpha}(\beta_i)$ выступают в роли соответствующих *коэффициентов разложения*; они представляют собой амплитуды вероятности того, что микрообъект, находившийся в α -состоянии, будет обнаружен в том или ином β -состоянии. Можно сказать, что согласно (11) *то или иное β -состояние «представлено» в α -состоянии с вероятностью $|\psi_{\alpha}(\beta_i)|^2$* .

Как уже отмечалось, квантовомеханический принцип суперпозиции состояний органически связан с соотношениями неопределенностей; его позитивное содержание «компенсирует» негативное содержание упомянутых соотношений. Образно говоря, соотношения неопределенностей указывают на то «старое», от чего следует отказаться при переходе от макроявлений к микроявлениям (надо, в частности, отказаться от одновременной измеримости тех или иных величин). В то же время принцип суперпозиции указывает на то «новое», чем следует пользоваться при рассмотрении микроявлений. Так, суперпозиция (11) означает, что если микрообъект находится в состоянии, в котором измеримы величины α -набора, то значения величин β -набора могут быть предсказаны *вероятностно* — с вероятностью, равной $|\psi_{\alpha}(\beta_i)|^2$.

Суперпозиция довольно часто встречается в классической физике; это прежде всего хорошо известная суперпозиция классических волн. С

математической точки зрения классическая суперпозиция и суперпозиция в квантовой физике аналогичны. Именно это обстоятельство немало стимулировало в свое время развитие квантовой теории. В то же время упомянутое обстоятельство затрудняло осмысливание физического содержания получаемых в этой теории результатов, поскольку порождало соблазн проводить неоправданные аналогии с классическими волнами. Как отмечал один из создателей квантовой механики, известный английский физик *Поль Адриен Морис Дирак* (1902–1984),

«...Допущение суперпозиционных связей между состояниями приводит к математической теории, в которой уравнения движения, определяющие состояния, линейны по отношению к неизвестным. Ввиду этого многие пытались установить аналогии с системами классической механики, такими, как колеблющиеся струны или мембраны, которые подчиняются линейным уравнениям, а следовательно, и принципу суперпозиции. Важно помнить, однако, что суперпозиция, которая встречается в квантовой механике, существенным образом отличается от суперпозиции, встречающейся в любой классической теории. Это видно из того факта, что квантовый принцип суперпозиции требует неопределенности результатов измерений».

Суперпозиция двух классических волн приводит к появлению *новой волны*, обладающей, естественно, и *новыми характеристиками*. Суперпозиция же двух состояний ξ_{β_1} и ξ_{β_2} , характеризующихся соответственно значениями β_1 и β_2 величин β -набора, отнюдь не приводит к состоянию с каким-либо новым значением β . Рассмотрим состояние:

$$\psi_{\alpha}(\beta_1)\xi_{\beta_1} + \psi_{\alpha}(\beta_2)\xi_{\beta_2}. \quad (*)$$

Будем измерять в этом суперпозиционном состоянии β -величину. При этом всякий раз будет реализоваться *одно из прежних значений* — либо β_1 , либо β_2 . Нельзя точно предсказать, какое именно из этих двух значений будет реализовано в конкретном случае, а можно лишь указать вероятность получения β_1 или β_2 . Вот эта-то неопределенность результатов измерений и определяет принципиальное отличие квантовой механической суперпозиции от классической.

Отметим, что суперпозиционное состояние (*) нельзя интерпретировать *в буквальном смысле* — как состояние, которое как бы «размазано» по разным состояниям суперпозиции (по состояниям ξ_{β_1} и ξ_{β_2}). Нельзя полагать, будто в данном случае микрообъект «находится в какой-то мере» (или «частично») в разных состояниях, составляющих суперпозицию. Нельзя, в частности, полагать, что в опыте с прохождением электронов через экран с двумя щелями микрообъект проходит частично через одну щель, а частично через другую. Пребывание микрообъекта в

суперпозиционном состоянии отвечает ситуации, когда микрообъект характеризуется *неким набором потенциальных возможностей*. Так, микрообъект, находящийся в состоянии (*), обладает потенциальными возможностями реализовать либо значение β_1 , либо значение β_2 величин β -набора. Электрон внутри двухщелевого интерферометра обладает потенциальными возможностями пройти либо через одну щель, либо через другую.

9.6 РЕАЛИЗАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МИКРООБЪЕКТА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ АКТЕ

Разговор о потенциальных возможностях микрообъекта мы начали еще в § 8.9 — в связи с обсуждением сущности корпускулярно-волнового дуализма. Теперь мы завершим этот разговор, обратив внимание читателя на то, что *та или иная потенциальная возможность микрообъекта реализуется всякий раз в процессе измерения* (в измерительном акте).

Измерительный процесс в квантовой физике состоит из трех последовательных этапов: 1) *подготовительного этапа*, когда микрообъект «приготавливают» в некотором состоянии φ_α , которое далее рассматривается как *начальное состояние*; 2) *рабочего этапа*, на котором происходит взаимодействие «приготовленного» микрообъекта с определенным *анализатором*, переводящим микрообъект в суперпозиционное состояние; 3) *регистрирующего этапа*, на котором происходит обнаружение микрообъекта в том или ином из состояний, образующих суперпозицию. На этом этапе микрообъект взаимодействует с неким макротелом, способным изменить свое состояние под воздействием микрообъекта; такое макротело называют *детектором*.

Если для простоты не рассматривать подготовительный этап, то абстрактная «схема» измерительного процесса может быть изображена условно в следующем виде:

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{Рабочий этап} \\ \hline \varphi_\alpha \longrightarrow \underbrace{\sum_i \psi_\alpha(\beta_i) \xi_{\beta_i}}_{\text{Регистрирующий этап}} \longrightarrow \xi_{\beta_i} \end{array}} \quad (12)$$

Основными элементами измерительного прибора (измерительной установки) являются, таким образом, анализатор и детектор. Как уже сказано, анализатор переводит микрообъект в суперпозиционное со-

стояние. Так, экран с двумя щелями играет роль анализатора в опыте с двухщелевым интерферометром. Роль детектора сводится, образно говоря, к тому, чтобы «подглядеть», как именно «поведет себя» микрообъект в той суперпозиции, которую создал анализатор. Это «подглядывание» предполагает, например, получение ответа на вопрос: Через какую именно щель прошел конкретный электрон в опыте с интерферометром?

Выделим из «схемы» (12) регистрирующий этап:

$$\sum_i \psi_{\alpha}(\beta_i) \xi_{\beta_i} \longrightarrow \xi_{\beta_j}. \quad (13)$$

Часто говорят, что «схема» типа (13) описывает «стягивание» суперпозиции $\sum_i \psi_{\alpha}(\beta_i) \xi_{\beta_i}$ к состоянию ξ_{β_j} . Этот процесс называют также «редукцией волнового пакета» или «коллапсом волновой функции».

Итак, если анализатор *создает определенную суперпозицию состояний*, то детектор ее *разрушает*, «стягивая» к одному из составляющих эту суперпозицию состояний. Какую информацию получает при этом наблюдатель? Очевидно, что если «схема» (12) испытана на одном единственном микрообъекте, то о получении полезной информации говорить трудно. Необходимо *повторить измерительный процесс для достаточно большого числа микрообъектов*. В этом случае наблюдатель может выяснить, во-первых, какие значения величин β -набора реализуются на практике, и, во-вторых, как часто микрообъект обнаруживается в том или ином β -состоянии. Тем самым можно экспериментально определить, во-первых, спектр значений величин β -набора и, во-вторых, вероятности $|\psi_{\alpha}(\beta_i)|^2$.

Мы уже говорили о принципиальном воздействии процесса измерения (наблюдения) на измеряемый (наблюдаемый) микрообъект. Это воздействие имеет необратимый характер. После того, как суперпозиция $\sum_i \psi_{\alpha}(\beta_i) \xi_{\beta_i}$ сколлапсировала (стянулась, редуцировала) к состоянию ξ_{β_j} , обратный ход с восстановлением данной суперпозиции оказывается уже невозможным. Конечно, с помощью некоторого анализатора можно превратить состояние ξ_{β_j} в суперпозиционное состояние, но это будет уже *иное* суперпозиционное состояние, отличающееся от исходной суперпозиции $\sum_i \psi_{\alpha}(\beta_i) \xi_{\beta_i}$. Необратимый характер измерительного процесса на завершающем этапе органически связан со *стохастичностью* этого процесса. Нельзя однозначно пред-

сказать, в какое именно β -состояние сколлапсирует исходная суперпозиция.

Суммируя сделанные выше замечания, приведем следующее высказывание академика *В.А. Фока*, взятое из его статьи «Об интерпретации квантовой механики» (Сб. «Философские вопросы современной физики», М.: Изд-во АН СССР, 1959):

«Вероятность того или иного поведения объекта в данных внешних условиях определяется внутренними свойствами данного объекта и этими внешними условиями. Это есть численная оценка потенциальных возможностей того или иного поведения объекта. Проявляется же эта вероятность в относительном числе осуществившихся случаев данного поведения объекта... Таким образом, *вероятность относится к отдельному объекту и характеризует его потенциальные возможности*. Вместе с тем для определения ее численного значения *необходима статистика осуществления этих возможностей*, т. е. многократное повторение опыта» (курсив наш. — Л.Т.).

Весьма принципиально то, что «вероятность относится к отдельному объекту». В отличие от классической физики, где статистические закономерности появляются не иначе, как закономерности поведения *больших совокупностей объектов*, квантовая физика рассматривает статистические закономерности *уже для отдельного объекта*. Это предопределяет специфику статистических коллективов в квантовой механике. «Элементами статистических коллективов, рассматриваемых в квантовой механике, — писал В.А. Фок, — являются не самые микрообъекты, а результаты опытов над ними, причем определенная постановка опыта соответствует определенному коллективу». Предположим, что над микрообъектом в состоянии φ_α производились измерения величин β -набора; многократное повторение измерений позволило получить некую совокупность чисел $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots$. Эта совокупность чисел и есть пример статистического коллектива в квантовой механике. Видоизменив опыт (используя соответствующий анализатор), можно перейти к измерению величин γ -набора; в этом случае наблюдатель будет иметь дело с иным статистическим коллективом: $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots$

Конечно, и в квантовой теории приходится рассматривать статистические коллективы, образованные совокупностью объектов. Однако подобные задачи уже выходят за рамки собственно квантовой механики, составляя предмет *квантовой статистики*. Квантовая статистика может рассматриваться как *дважды статистическая теория*, поскольку имеет дело как со статистическими коллективами, относящимися к отдельному микрообъекту, так и со статистическими коллективами, относящимися к большой совокупности микрообъектов.

9.7 СПЕЦИФИКА КВАНТОВОМЕХАНИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА; ДИАЛЕКТИКА ВОЗМОЖНОГО И РЕАЛЬНОГО

Специфика квантовомеханического измерительного процесса заключается в невозможности наглядного представления ни рабочего этапа (когда анализатор создает суперпозицию состояний микрообъекта), ни заключительного этапа (когда детектор «стягивает» суперпозицию к одному состоянию). Уже отмечалось, что нельзя полагать, будто на рабочем этапе измерительного процесса микрообъект в буквальном смысле «размазывается» по разным состояниям суперпозиции. Точно так же нельзя полагать, будто на заключительном этапе «размазанный» по разным состояниям микрообъект вдруг сразу (как только вступит в игру детектор) «соберется целиком» в одном из состояний. Особенно много споров вызывала в свое время трактовка заключительного этапа процесса измерения. Сторонники модельной (классической) интерпретации микрообъектов и микроявлений, естественно, заходили в тупик, пытаясь наглядно представить редукцию волнового пакета. Поскольку образующие суперпозицию состояния могут быть *разнесены пространственно*, то в этом случае редукция волнового пакета должна была бы фактически означать *мгновенную* пространственную локализацию микрообъекта.

Приводился, в частности, следующий пример. Волновой пакет, взаимодействуя с полупрозрачным зеркалом (зеркало играет роль анализатора), частично отражается, а частично проходит дальше, что соответствует «размазыванию» микрообъекта по составляющим суперпозицию двум состояниям. На пути каждой из частей волнового пакета поставлено по детектору. Известно, что всякий раз срабатывает только один детектор. Допустим, что сработал детектор на пути отраженной части волнового пакета. Получается, что другая часть волнового пакета должна мгновенно исчезнуть из той области пространства, где находится несработавший детектор, и появиться за мгновение до акта регистрации перед другим детектором. Вполне очевидна абсурдность подобного «поведения» микрообъекта, который, кстати говоря, «не может знать», какой из детекторов сработает в каждом конкретном случае.

В 60-х годах прошлого столетия достаточно широко обсуждалась *гипотеза о «скрытых параметрах»*. Она предполагала существование у микрообъекта неких «скрытых параметров», которые как раз и отвечают за наблюдаемые статистические закономерности в поведении микрообъекта; при этом сами «скрытые параметры» подчиняются дина-

мическим закономерностям. В настоящее время имеются убедительные доказательства *несостоятельности* такой гипотезы. По образному выражению известного российского физика *Дмитрия Ивановича Блохинцева* (1907–1979), в квантовой механике «*динамика и статистика неразделимы*, что не позволяет в принципе даже самому усидчивому математику или вычислительной машине, какой бы совершенной она ни была, освободиться от статистического описания микромира» (курсив наш. — Л.Т.). Все это еще раз подчеркивает принципиальную невозможность классической (наглядной) интерпретации микрообъекта и вместе с тем говорит о существовании в природе *объективной* случайности,

Отказавшись от наглядного толкования как образования суперпозиционного состояния, так и его коллапса, мы должны ограничиться рассмотрением потенциальных возможностей микрообъекта и их реализации, в измерительном акте. Здесь уместно обратиться к такой диалектической категории как *возможное и действительное*. Напомним, что к *диалектическим категориям* относятся пары категорий, являющихся едиными в своей противоположности. Существующее между категориями «возможное» и «действительное» *противоречие* разрешается всякий раз, когда потенциальная возможность тем или иным образом реализуется. Каждая конкретная ситуация характеризуется множеством потенциальных возможностей; реализуется же одна из них. Процесс реализации необратим — как только он состоялся, исходная ситуация *качественно изменяется* (одна из возможностей реализуется *за счет того*, что остальные имевшиеся ранее возможности оказываются теперь исключенными). Реализовавшаяся возможность соответствует *новой* ситуации, обладающей, в свою очередь, *новыми* потенциальными возможностями.

В классической механике, как и во всех теориях динамического типа, проблема различия возможного и действительного, по сути дела, не возникает. Совсем иное дело квантовая механика, где случайность присутствует в поведении уже отдельного объекта. Именно с точки зрения *разрешения противоречия между возможным и действительным* надо рассматривать процесс измерения в квантовой механике. При взаимодействии микрообъекта с детектором как раз и происходит отмеченное разрешение противоречия; при этом *суперпозиция потенциально возможных альтернатив, разрушаясь, заменяется одной реализовавшейся альтернативой*. Можно сказать, что «формула» (13) является математическим выражением процесса, в котором разрешается диалектическое противоречие между возможным и действительным. Акт этого разрешения носит характер *необратимого и неконтролируемого скачка*.

9.8 ФОТОНЫ, ПОЛЯРИЗАТОРЫ И СУПЕРПОЗИЦИЯ СОСТОЯНИЙ

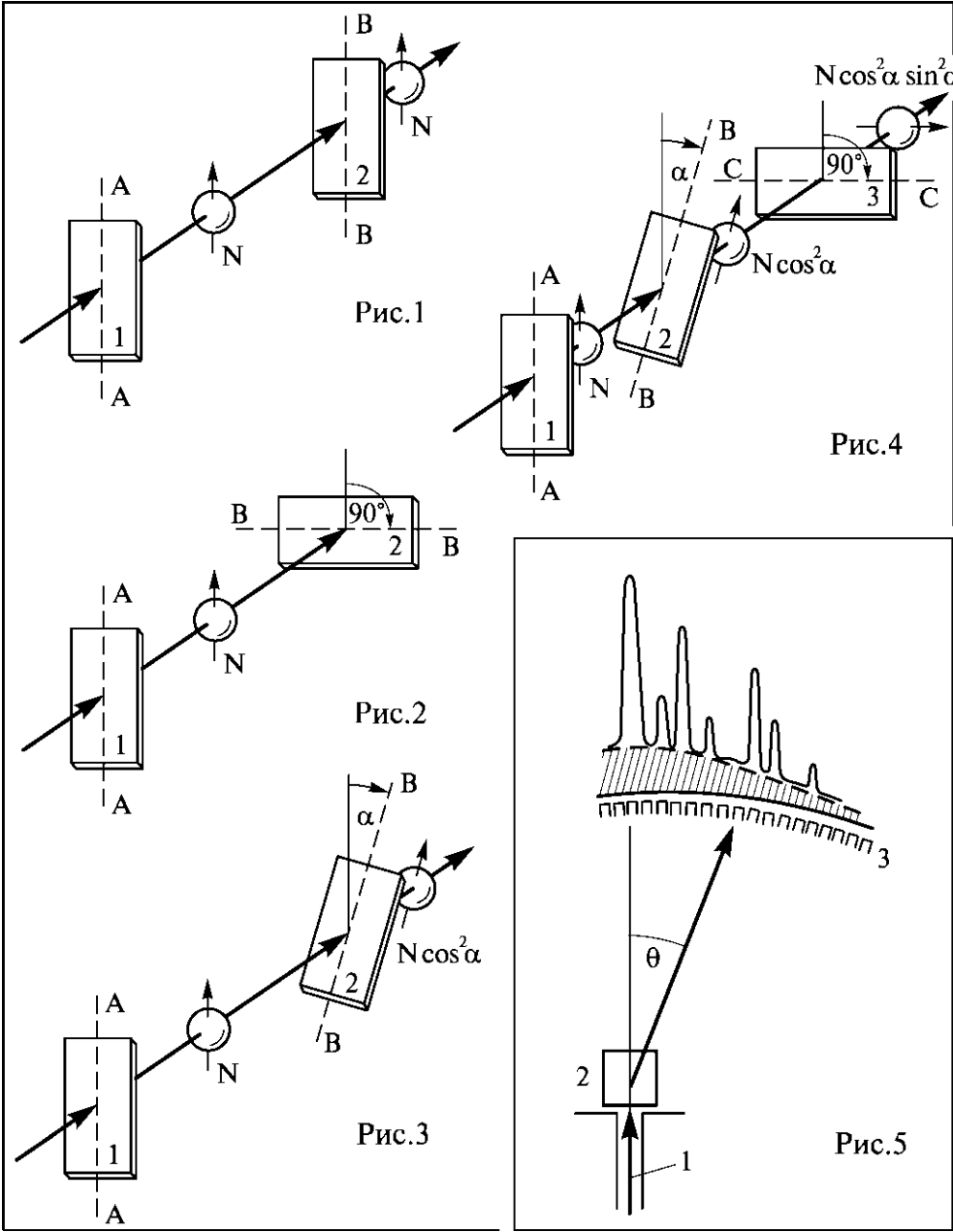
9.8.1. Удивительный результат в опыте с тремя поляризаторами. Пропустим пучок света через *поляризатор*, например кристалл турмалина. Из кристалла выйдет *линейно поляризованный* световой пучок. Направление поляризации пучка совпадает с направлением *оси поляризатора*. Обозначим через I интенсивность линейно поляризованного светового пучка. Далее поместим на пути этого пучка второй поляризатор и рассмотрим три случая: а) ось второго поляризатора *параллельна* оси первого, б) ось второго поляризатора *перпендикулярна* оси первого, в) ось второго поляризатора *составляет угол α* с осью первого. Будем измерять интенсивность света после второго поляризатора. В случае а) получим интенсивность I , в случае б) ничего не получим, в случае в) получим световой пучок интенсивности $I \cos^2 \alpha$, поляризованный вдоль оси второго поляризатора. Указанным трем случаям отвечают соответственно рисунки 1, 2 и 3 в таблице 17; здесь AA — направление оси первого поляризатора (поляризатора 1), BB — направление оси второго поляризатора (поляризатора 2).

Описанный опыт хорошо известен в классической оптике. Однако, подобно интерференционному опыту Юнга, рассмотренному в § 9.1, он имеет прямое отношение к квантовой механике. Как и в случае интерференции, будем уменьшать интенсивность светового пучка до тех пор, пока через наше устройство не пойдут одиночные фотоны. Рассмотрим проиллюстрированные на рисунках 1, 2 и 3 случаи в применении к отдельным фотонам.

Напомним, что *фотон характеризуется определенной поляризацией*, которая соответствует поляризации той классической световой волны, из которой «взят» рассматриваемый фотон. Это означает, что после поляризатора 1 будем иметь линейно поляризованные в направлении оси AA фотоны (см. короткие стрелки на рисунках). Вот с этими фотонами и будем далее «работать», называя их условно *исходными фотонами*.

В случае а), изображенном на рисунке 1, исходный фотон всегда проходит через поляризатор 2. В случае б), изображенном на рисунке 2, напротив, никогда не проходит. Эти результаты не представляются неожиданными. А вот в случае в), изображенном на рисунке 3, фотон может не пройти через поляризатор 2, но может и пройти. При этом нельзя точно предсказать, какая именно из двух альтернатив (прошел или не прошел) будет реализована тем или иным конкретным исходным фотоном. Если случится так, что фотон пройдет через поляризатор 2, то его поляризация окажется измененной — он будет поляризован в направлении оси поляризатора 2.

Таблица 17. К прохождению фотонов через поляризаторы и рассеянию нейтронов на кристалле



Предположим, что имеется N исходных фотонов. Проследим за их прохождением через поляризатор 2 в случае в). Оказывается, если N достаточно велико, то число прошедших фотонов можно предсказать с неплохой точностью — оно близко к $N \cos^2 \alpha$. Можно сказать, что существует *определенная вероятность* исходному фотону пройти через поляризатор 2; эта вероятность равна $\cos^2 \alpha$.

А теперь усложним опыт. Используем случай, изображенный на рисунке 3 в таблице 17, и добавим еще один (третий) поляризатор, ось которого CC направим перпендикулярно оси AA поляризатора 1. Рассматриваемая схема с тремя поляризаторами показана на рисунке 4 в таблице 17. Пусть число исходных фотонов равно N . После поляризатора 2 будем иметь, как уже известно, $N \cos^2 \alpha$ фотонов, поляризованных в направлении BB . Рассуждая далее аналогичным образом, заключаем, что после поляризатора 3 мы должны иметь $N \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha$ фотонов, причем поляризация этих фотонов должна совпадать с направлением оси CC поляризатора 3. Опыт действительно подтверждает такое заключение.

Как будто бы ничего удивительного. И тем не менее есть здесь один момент, который *противоречит* нашим привычным представлениям. Попробуйте убрать поляризатор 2. В этом случае после поляризатора 3 не будет обнаружено никаких фотонов! Получается довольно любопытная ситуация. Фотоны идут через некое устройство, как бы «фильтруясь» сначала вторым, а затем третьим поляризатором. В результате сначала мы имеем N фотонов, затем $N \cos^2 \alpha$ фотонов и, наконец, $N \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha$ фотонов. Мы убираем один из «фильтров» и, казалось бы, тем самым улучшаем условия прохождения фотонов через рассматриваемое устройство. Однако в действительности все оборачивается иначе: теперь фотоны вообще не проходят через устройство! Как может быть, что, *убирая один из трех фильтров, мы тем самым не повышаем вероятность прохождения фотонов через систему «фильтров», а напротив, сводим эту вероятность к нулю?* Объяснение этому удивительному факту дает квантовомеханический принцип суперпозиции состояний.

9.8.2. Опыты с поляризаторами и суперпозиция состояний. Воспользовавшись принципом суперпозиции состояний, объясним результат опыта с тремя поляризаторами. Обозначим состояние поляризации фотона после поляризатора 1 через φ_α . В соответствии с принципом суперпозиции представим состояние φ_α как суперпозицию состояний ξ_E и ξ_F , отвечающих поляризациям фотона соответственно вдоль и поперек оси поляризатора 2:

$$\varphi_\alpha = \psi_\alpha(E) \xi_E + \psi_\alpha(F) \xi_F = \cos \alpha \cdot \xi_E + \sin \alpha \cdot \xi_F. \quad (*)$$

Поляризатор 2 пропускает фотоны только в состоянии ξ_E . Поскольку, согласно (*), состояние ξ_E «представлено» в состоянии φ_α с вероятностью $\cos^2 \alpha$, то поэтому из N исходных фотонов через поляризатор 2 пройдут $N \cos^2 \alpha$ фотонов, причем все прошедшие фотоны окажутся в состоянии ξ_E , т. е. будут поляризованы вдоль оси поляризатора 2. Итак, перед поляризатором 2 фотон пребывал как бы частично в состоянии ξ_E , а частично в состоянии ξ_F . В момент прохождения фотона через поляризатор эта «двойственность» исчезает, причем в одних случаях фотон реализуется в состоянии ξ_E и тогда он не проходит через поляризатор, а в других случаях реализуется состояние ξ_F и тогда фотон проходит через поляризатор. Для каждого конкретного фотона невозможно однозначно предсказать, какое именно состояние будет реализовано.

При рассмотрении прохождения фотонов через поляризатор 3 рассуждаем аналогичным образом. Состояние ξ_E представим как суперпозицию состояний η_e и η_f , отвечающих поляризациям фотона соответственно вдоль и поперек оси поляризатора 3:

$$\xi_E = \sin \alpha \cdot \eta_e + \cos \alpha \cdot \eta_f. \quad (**)$$

Поляризатор 3 пропускает фотоны только в состоянии η_e . Это состояние «представлено» в состоянии ξ_E с вероятностью $\sin^2 \alpha$. Поэтому из $N \cos^2 \alpha$ фотонов через поляризатор 3 пройдут $N \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha$ фотонов, причем все они окажутся в состоянии η_e .

Если теперь убрать поляризатор 3, то вместо (*) будем иметь:

$$\varphi_\alpha = \psi_\alpha(e) \eta_e + \psi_\alpha(f) \eta_f. \quad (***)$$

Легко сообразить, что $\psi_\alpha(e) = \cos 90^\circ = 0$ и $\psi_\alpha(f) = \sin 90^\circ = 1$. Следовательно, $\varphi_\alpha = \eta_f$. В данном случае фотон в момент прохождения через поляризатор 3 реализуется только в состоянии η_f и поэтому пройти через поляризатор не сможет.

9.9 Те ли это волны?

Или: ВСЕГДА ли ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЯЗАНА С ВОЛНАМИ?

Автор. Мы в состоянии теперь выделить то главное, что есть в квантовой механике, т. е. ответить на вопрос: В чем квантовая механика принципиально отлична от классической? Но предварительно попробуйте дать свой ответ на этот вопрос.

Читатель. Если сказать кратко, то все дело в том, что классические световые волны представляются в квантовой механике частицами (фо-

тонами), тогда как классические частицы рассматриваются как волны. На мой взгляд, специфика квантовой механики проявляется главным образом в корпускулярно-волновом дуализме.

Автор. Я не удивляюсь, что привычка к наглядным образам выдвинула в Вашем сознании на первый план корпускулярно-волновой дуализм, оставив где-то на втором плане амплитуды вероятностей. И это несмотря на то, что мы уделили амплитудам вероятностей немало внимания. Надо заметить, что все, кто впервые знакомится с квантовой физикой, стараются, по возможности, не рассматривать вероятностные представления и акцентируют свое внимание на представлениях волновых и, в частности, на волнах де-Бройля, уподобляя их неким материальным волнам.

Читатель. Я знаю, что волны де-Бройля — это некие условные волны. Однако, почему бы не использовать волновые представления хотя бы условно? Ведь они весьма наглядны.

Автор. Дело в том, что роль волновых представлений часто *преувеличивают*, а роль вероятностных представлений, наоборот, *недооценивают*. Нередко получается так, что не остается, по сути дела, ничего кроме волн. А в такой ситуации уже нет речи об условности волновых образов. Волны воспринимаются вполне реально — как некие материальные волны, которые либо свободно распространяются в пространстве, либо «заперты» в атомах и молекулах, уподобляемых своеобразным резонаторам. Напомню в связи с этим приводившееся в § 9.5 критическое замечание Поля Дирака о том, что при обсуждении квантовой механики «многие пытались установить аналогии с системами классической механики, такими как колеблющиеся струны или мембраны».

Читатель. Все-таки волновые представления могут быть полезными в квантовой механике. В некоторых случаях они позволяют просто и наглядно получить результат. Я припоминаю рисунок 4 из таблицы 13, иллюстрирующий задачу об определении уровней энергии E_n в одномерной потенциальной яме шириной a с бесконечно высокими стенками. В этой задаче дебройлевскую полуволну укладывали на ширине ямы целое число раз:

$$a = n\lambda_n/2. \quad (*)$$

Подставляя сюда соотношение

$$\lambda_n = h/p_n, \quad (**)$$

где p_n — импульс электрона, и принимая во внимание связь между энергией и импульсом

$$p_n = \sqrt{2mE_n}, \quad (***)$$

получали выражение для уровней энергии электрона в яме:

$$E_n = n^2 \hbar^2 / (8ma^2). \quad (****)$$

Все очень просто и наглядно!

Автор. Возможно, Вы будете удивлены, если я скажу, что приведенный Вами пример работает *против* Вас же. Этот пример нередко приводится в книгах по квантовой механике. К сожалению, он *некорректен*. Здесь предполагается, что электрон в яме имеет определенную длину дебройлевской волны. Из (**) следует, что в таком случае должен быть определенным также импульс электрона. Однако согласно соотношениям неопределенностей для импульса и координаты импульс электрона в яме шириной a должен иметь неопределенность $\Delta p_n \approx \frac{\hbar}{2\pi a}$. Для не слишком больших n эта неопределенность имеет такой же порядок, что и величина p_n , определяемая соотношениями (*) и (**). Значит, даже приблизительно нельзя считать, что каждому уровню энергии в яме отвечает свое определенное значение импульса электрона (своя определенная длина дебройлевской волны). Таким образом, упомянутый Вами рисунок 4 из таблицы 13 оказывается, по сути дела, бессмысленным. Нельзя уподоблять электрон в яме классической стоячей волне в некоем резонаторе.

В серьезных книгах по квантовой механике (см., например, Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, Квантовая механика. М.: Наука, 1974) можно найти следующее выражение для плотности вероятности импульса электрона, находящегося на n -м уровне в яме шириной a с бесконечно высокими стенками:

$$w(p_n) = \frac{n^2 \hbar^3 / (2\pi^2)}{(n^2 \hbar^2 / 4 - p_n^2 a^2)^2} \cdot \begin{cases} \cos^2(\pi p_n a / \hbar) & \text{для нечетных } n; \\ \sin^2(\pi p_n a / \hbar) & \text{для четных } n. \end{cases}$$

Импульс электрона в яме имеет не определенное значение импульса, а лишь определенную плотность вероятности того или другого значения импульса!

Читатель. Но, насколько мне известно, результат (****) верен!

Автор. Результат (****) действительно верен. Дело в том, что в приведенных Вами рассуждениях была допущена не одна, а две ошибки — произошла их взаимная компенсация. Ошибочно не только соотношение (*), но и соотношение (***).

Читатель. Однако соотношение (***), — это хорошо известная связь между энергией и импульсом: $E = p^2 / (2m)$. Разве она не годится для электронов?

Автор. Она годится, если электрон свободен. Но для электрона в связанном состоянии (электрона, движущегося в ограниченной области)

ти пространства) она не годится. Да и как она может годиться, если у электрона в яме энергия определенная, а импульс неопределенный?

Итак, как Вы убедились, приведенный пример с электронными волнами в потенциальной яме оказался на проверку неудачным. *Неправомерно проводить аналогию между электроном в яме и классической волной внутри резонатора.* Этот пример учит нас относиться с осторожностью к волновым моделям в квантовой физике. Дебройлевские волны не похожи на реальные волны. Собственно говоря, этих волн попросту нет.

Читатель. Но как без волн объяснить наблюдаемое на опыте интерференционное распределение попаданий электронов на экране в интерферометре?

Автор. В том-то и дело, что *интерференцию и дифракцию микрообъектов следует объяснять не на основе волновых представлений, а используя вероятностные представления.* Интерференция микрообъектов обусловлена тем, что при определенных условиях происходит сложение не вероятностей микрособытий, а амплитуд вероятностей. *Интерференция микрообъектов — это, в конечном счете, интерференция амплитуд вероятностей.*

Читатель. Все же очень непривычно рассматривать интерференцию без волн.

Автор. Надо привыкать, коль скоро электронные волны в действительности не существуют.

Читатель. А как быть с фотонными волнами? Существуют же классические световые волны!

Автор. Здесь иная ситуация. Будучи бозонами, фотоны проявляют тенденцию к накоплению в одном и том же состоянии. При достаточно большом числе фотонов в одном и том же состоянии как раз и возникает световая волна. Ее параметры (волновой вектор, частота, поляризация) совпадают с соответствующими волновыми характеристиками фотона; это есть характеристики того состояния, в котором произошло накопление фотонов. Классическая световая волна возникает как *коллективный эффект*. Для электронов же, как и других *фермионов*, подобный коллективный эффект принципиально невозможен, поскольку фермионы могут заселять состояния только поодиночке. Поэтому и не существуют классические электронные и вообще фермионные волны.

Читатель. Получается, что есть две интерференции: *классическая* (обусловленная сложением волн) и *квантовофизическая* (обусловленная сложением амплитуд вероятностей)?

Автор. Именно так. Классическая интерференция наблюдается только в бозонных коллективах. Она как бы маскирует квантовофизическую интерференцию. Но в случае фермионов, например электронов, такой

маскировки нет — там наблюдается только квантовофизическая интерференция.

Читатель. Объяснение интерференции на языке вероятностей страдает отсутствием наглядности. В конце концов, волны де-Бройля несколько не хуже объясняют возникновение интерференционной картины, нежели интерферирующие амплитуды вероятностей. Волны дают наглядное объяснение.

Автор. Волны могут объяснить *возникновение* интерференционной картины в случае, когда альтернативы неразличимы. Однако они не объясняют *разрушение* интерференции в случае, когда альтернативы оказываются различимыми. Получается, что пока мы светим на щели интерферометра, микрообъекты ведут себя как волны, но лишь только мы включаем свет, упомянутые волны немедленно исчезают.

Читатель. Это можно попробовать объяснить тем, что, включая или выключая свет, мы тем самым воздействуем на условия, в которых осуществляется эксперимент.

Автор. Можно рассмотреть ситуацию, когда нет каких-либо изменений условий эксперимента. Я имею в виду опыты по дифракции на кристалле очень медленных нейтронов. Оставаясь в рамках волновых представлений, нам пришлось бы здесь допустить, что «волны материи» *одновременно и присутствуют, и отсутствуют*. Согласитесь, что это выглядит абсурдно.

Читатель. Нельзя ли рассказать подробнее об этих опытах?

Автор. Рассмотрим эксперимент, схема которого показана на рисунке 5 в таблице 17. Здесь: 1 — исходный пучок нейтронов из реактора (пучок монохроматичен и хорошо коллимирован, энергия нейтронов порядка 0,1 эВ), 2 — кристалл, 3 — детекторы, регистрирующие нейтроны, рассеянные на разные углы θ . Распределение попаданий нейтронов в детекторы описывается кривой, изображенной на том же рисунке. Она представляет собой наложение четких интерференционных максимумов на некий фон, описываемый плавной штриховой кривой (для наглядности этот фон выделен штриховкой). Получается, что *одни нейтроны ведут себя как волны* и обуславливают интерференционные максимумы, а в то же самое время *другие нейтроны волновых свойств не обнаруживают* и распределяются в соответствии с плавной штриховой кривой.

Читатель. Действительно, это выглядит довольно нелепо.

Автор. Однако результаты опыта получают разумное объяснение, если оставить в покое волны, а использовать вероятностные представления. Пусть $\varphi_i(\theta)$ — амплитуда вероятности рассеяния нейтрона на i -ом атомном ядре кристаллической решетки на угол θ . В кристаллическом об-

разце N ядер; следовательно, имеются N альтернатив — каждая отвечает рассеянию нейтрона на соответствующем ядре. Если альтернативы неразличимы (ядра предполагаются тождественными), то вероятность нейтрону рассеяться на угол θ есть

$$|\varphi(\theta)|^2 = \left| \sum_i^N \varphi_i(\theta) \right|^2. \quad (14)$$

Это соотношение аналогично соотношениям (4) и (7); оно объясняет возникновение интерференционных пиков в картине распределения рассеянных нейтронов. Однако даже при условии, что все ядра в кристалле тождественны, альтернативы не всякий раз оказываются неразличимыми. Есть вероятность того, что при рассеянии какого-то нейтрона произойдет изменение направления спина (спин нейтрона перевернется). Тогда в соответствии с законом сохранения момента импульса должно измениться направление спина ядра-рассеивателя. Теперь ядро, на котором произошел акт рассеяния, оказывается *физически выделенным* — это есть то самое ядро, спин которого изменил направление. Поэтому для таких нейтронов (нейтронов, спин которых при рассеянии перевернулся) надо складывать не амплитуды, а сами вероятности:

$$|\psi(\theta)|^2 = \sum_i^N |\psi_i(\theta)|^2. \quad (15)$$

Мы ввели для амплитуды рассеяния с переворачиванием спина обозначение ψ (в отличие от обозначения φ для амплитуды рассеяния без переворачивания спина). Результирующая вероятность $w(\theta)$ рассеяния на угол θ есть

$$w(\theta) = |\varphi(\theta)|^2 + |\psi(\theta)|^2. \quad (16)$$

Итак, мы убеждаемся, что кривая на рисунке 5 в таблице 17 получает естественное объяснение не на языке волн, а на языке вероятностей.

9.10 КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА КАК КАЧЕСТВЕННЫЙ СКАЧОК В ПРОЦЕССЕ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ МИРА

9.10.1. Примат вероятностных закономерностей; существование в природе объективной случайности. Если попытаться кратко сформулировать то главное, что дала квантовая механика человеку, познающему окружающий

его мир, то придется прежде всего отметить *глобальную роль вероятности* в этом мире. Квантовая механика показала, что основными (фундаментальными) закономерностями являются закономерности не динамического, а *статистического* типа, и что *вероятностная форма причинности есть основная форма*, тогда как классический (лапласовский) детерминизм представляет собой лишь предельный случай. Напомним, что в классической физике вероятностные закономерности стали рассматриваться лишь с середины XIX века. При этом они применялись к большим коллективам, тогда как поведение отдельного объекта описывалось в рамках жесткого детерминизма. Квантовая механика показала, что вероятностные закономерности применимы не только к коллективам, но и к отдельному объекту. *Поведение уже одного микрообъекта имеет ярко выраженный вероятностный характер*. Доказательство несостоятельности гипотезы о «скрытых параметрах» явилось одновременно доказательством существования в природе *объективной случайности* и тем самым показало, что вероятностное описание отнюдь не обязательно связывать с неполнотой наших знаний.

9.10.2. Новые отношения между вероятностями. В теории вероятностей, использующейся в математике, классической физике, технике, различают, как известно, события *совместные* и *несовместные*. Совместные события могут быть *зависимыми* и *независимыми*. Но при этом события всегда подразумеваются *различимыми*. Квантовая механика наряду с различимыми несовместными событиями (для которых «работает» правило *сложения вероятностей*) ввела в рассмотрение также несовместные *неразличимые* события (для которых «работает» правило *сложения амплитуд вероятностей*). Иначе говоря, квантовая механика обнаружила, что с вероятностями на уровне микроявлений следует обращаться не совсем так, как это практикуется в классических статистических теориях. Оказалось, что в определенных случаях надо складывать не сами вероятности событий, а амплитуды этих вероятностей или использовать более сложные правила, связанные с частичной различимостью событий. *Не сама вероятность, а амплитуда вероятности (волновая функция) оказывается первичной величиной*. «Работа» с амплитудами вероятностей (в случаях полной неразличимости или частичной различимости событий) приводит к *интерференционным эффектам*; соответствующего аналога в классической физике не существует. С *интерференцией амплитуд органически связан квантовомеханический принцип суперпозиции состояний*, отражающий специфику «взаимоотношений» состояний микрообъекта.

9.10.3. Новый взгляд на интерференцию. Интерференция амплитуд вероятностей в квантовой механике ставит вопросы интерференции как бы в новой плоскости. До появления квантовой механики интерференцию всегда рассматривали как пример *специфически волнового явления*.

Если в каком-либо эксперименте обнаруживалась характерная интерференционная картина, то это считалось безусловным основанием для вывода о присутствии неких волн. В этом смысле волны рассматривались как нечто *первичное*, а интерференция — как *вторичное*. Квантовая механика показала, что более оправдана *противоположная* расстановка акцентов и что в основе интерференционной картины не обязательно должны лежать классические волновые процессы. Проще говоря, *возможна интерференция без волн*. В общем случае *интерференция — это специфическое квантовомеханическое явление, связанное со сложением амплитуд вероятностей*.

Продemonстрировав фундаментальность явления интерференции, квантовая механика, безусловно, стимулировала интерес к исследованию этого явления в различных областях физики. Можно полагать, что современная физика, отталкиваясь от *явления интерференции*, получит дальнейшее развитие на пути исследования *интерференции явлений*. Для нас привычна картина «сложения» (суммирования, накопления) различных явлений, что можно в определенном смысле сопоставить со «сложением вероятностей». Возможно, такая картина есть результат некоего «усреднения», огрубления, упрощения более тонкой и красивой картины, когда «складываются» не сами явления, а нечто иное (то, что на языке квантовой механики есть амплитуда вероятности), — в итоге и возникает эффект интерференции явлений.

9.10.4. Принцип дополнителъности. Особого внимания заслуживает выдвинутый Нильсом Бором в 1927 году *принцип дополнителъности*. Фактически этот принцип составляет логическую основу всей системы квантовомеханических представлений. Согласно принципу дополнителъности, информацию об объекте, полученную при *некоторых определенных* условиях, следует рассматривать как *дополнителъную* к информации, полученной при *других* условиях. Существенно, что данные, полученные при разных условиях, могут противоречить друг другу в том смысле, что они *могут не складываться, не комбинироваться в некую единую картину*. Тем не менее они отражают разные (дополняющие друг друга) стороны *единой* реальности, отвечающей исследуемому объекту, и как таковые *должны в равной мере приниматься во внимание*. Принцип дополнителъности находит свое прямое выражение, в частности, в идее корпускулярно-волнового дуализма и в соотношениях неопределенностей.

Предоставим слово Бору.

— «Термин «дополнителъность» подчеркивает то обстоятельство, что в противоречащих друг другу явлениях мы имеем дело с *различными, но одинаково существенными* аспектами единого комплекса сведений об объекте...

– В атомной физике слово «дополнительность» употребляют, чтобы характеризовать связь между данными, которые получены при разных условиях опыта и *могут быть наглядно истолкованы лишь на основе взаимно исключающих друг друга представлений...*

– Данные, полученные при разных условиях опыта, не могут быть охвачены одной единственной картиной. Эти данные должны скорее рассматриваться как дополнительные...

– В квантовой физике данные об атомных объектах, полученные при помощи разных экспериментальных установок, находятся в своеобразном дополнительном отношении друг к другу. Действительно, следует признать, что такого рода данные, *хотя и кажутся противоречащими друг другу при попытке скомбинировать их в одну картину, на самом деле исчерпывают все, что мы можем узнать о предмете...* (Везде курсив наш. — Л.Т.).

Порекомендуем читателю еще раз внимательно прочитать замечания, сделанные Бором по поводу принципа дополнительности. Итак, данные о микрообъектах могут быть «наглядно истолкованы» лишь на основе «взаимно исключающих друг друга представлений». В этом смысле они «не могут быть охвачены единой картиной». Различные данные находятся в «своеобразном» (этот эпитет не должен пройти мимо внимания читателя) отношении друг к другу, для чего и применяется термин «дополнительность». Своеобразие отношения «дополнительности» в том, что хотя дополнительные друг по отношению к другу данные «кажутся противоречащими друг другу при попытке скомбинировать их в одну картину», однако только в своей совокупности эти данные «исчерпывают все, что мы можем узнать о предмете».

Неоднократно подчеркивавшаяся выше специфика квантовомеханических представлений с их несколько необычной логикой в известном смысле покоится на принципе дополнительности. Микрообъект не является ни корпускулой, ни волной; но в то же время, чтобы описать микрообъект, мы пользуемся обоими взаимно исключающими друг друга образами. Возможен щекотливый вопрос: Нет ли тут опасности отрыва образа от объекта, опасности субъективизма? Отрицательный ответ на этот вопрос дает именно принцип дополнительности, который утверждает, что речь идет о *взаимно дополняющих образах*, адекватно отражающих разные стороны объективной реальности, именуемой микрообъектом. «Этот пункт логически важен, — подчеркивал Бор, — так как только то обстоятельство, что мы стоим перед выбором или (!) следить за траекторией частицы, или (!) же наблюдать интерференцию, позволяет нам избежать парадоксального вывода о том, что поведение электрона или фотона должно зависеть от наличия в экране щели, сквозь которую он заведомо не проходил».

9.10.5. Диалектический характер квантовой механики. В той или иной степени диалектичность присуща любой физической науке, коль скоро она имеет дело с объективной реальностью. Тем не менее можно утверждать, что классическая физика по самому стилю своей философии (однозначность предсказаний в теориях динамического типа, подход к любому объекту как «набору» определенных «деталей», рассмотрение явления как последовательности определенных элементарных событий) тяготеет к *метафизике*. Квантовая механика убедительно показала, что *более глубокий уровень* познания окружающего мира неизбежно связан с более серьезным и глубоким овладением и применением *материалистической диалектики*.

Говоря о сугубо диалектическом характере квантовой механики, выделим два момента. Момент первый: *утверждение отношений диалектического типа*. Для метафизического мышления характерно простое накопление, суммирование данных, свойств, понятий; будем говорить, что характерны *отношения суммирования*. Эти отношения составляют в известном смысле логическую основу классической физики. Квантовая механика выдвигает на первый план отношения качественно иного (диалектического) типа — *отношения дополнительности* и *отношения интерференции*. Так, она показывает, что данные об объекте, строго говоря, не просто складываются, но *дополняют* друг друга, что вероятности разных событий, строго говоря, не суммируются, но *интерферируют* друг с другом. В этом смысле квантовая механика определяет тенденции развития современной физики и вообще современной науки.

Момент второй: *использование категорий диалектики*. В классических теориях динамического типа понятия необходимого и случайного, возможного и действительного выступают не как категории диалектики. Необходимость является здесь абсолютной (метафизической) противоположностью случайности; последняя попросту изгоняется из теории, что немедленно приводит к *отождествлению* понятий возможного и действительного. Как *диалектические категории*, отношения между которыми характеризуются единством и борьбой противоположностей, указанные понятия выступают в статистических теориях. Существенно, что в квантовой механике категории необходимого и случайного, возможного и действительного используются в отношении не только коллектива объектов, но уже отдельного микрообъекта. Отметим, что лишь на основе диалектических категорий необходимого и случайного возможен анализ причинности в квантовой механике. Лишь используя категории потенциально возможного и действительного можно объяснить квантовомеханическую суперпозицию состояний и ее разрушение в измерительном акте.

ИНТЕРМЕДИЯ: ПРОТИВОРЕЧАТ ЛИ КВАНТОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ «ЗДРАВОВОМУ СМЫСЛУ»?

Здравый смысл — это тот пласт предрас-
судков, который мы накапливаем до шест-
надцати лет.

Альберт Эйнштейн

Равновесие между серьезностью и шут-
кой напоминает нам о дополнительных ас-
пектах, бросающихся в глаза в детской игре
и не менее ценимых взрослыми.

Нильс Бор

В этой необычной беседе «участвуют» (кроме Автора) физики *Нильс Бор* и *Леон Купер* (род. 1930 г.) литературный критик *Николай Добролюбов* (1836–1861) и ска-
зочник *Шарль Перро* (1628–1703). Беседа построена с использованием цитат из
работ Бора, Купера, Добролюбова и выдержек из сказки Перро «Золушка».

Купер. Многие наши современники горько жалуются, что совре-
менная физика стала слишком абстрактной, потеряла связь с вещами,
доступными пониманию простых смертных, стала противоречить здра-
вому смыслу...

Автор. Что ж, поговорим о квантовой механике и «здравом смысле».

Но кто знает, что такое «здравый смысл»? Если я не ошибаюсь, лич-
но Вы рассматриваете понятие «здорового смысла» как относительное,
изменяющееся по мере развития науки.

Купер. Действительно, здравый смысл нового поколения состоит из
понятий, вымученных старым поколением, и что считалось передовым
для одного поколения, становится здравым смыслом и будничным для
следующего. Сомнительно, чтобы ньютоновское представление мира
казалось бы здравым смыслом для греков времен Аристотеля. И все,
кто сейчас так очарован своим здравым смыслом (соответствующим в
настоящее время миру Ньютона), ничем не отличаются от тех, кто в
свое время жаловался, что механические идеи Ньютона разрушили вол-
шебный мир Средневековья... Впрочем, если говорить о здравом смыс-
ле современного поколения физиков, то он опирается на квантовую
теорию.

Автор. Не будем говорить о физиках. Речь идет о «простых смерт-
ных». Тех самых, которые «горько жалуются», что современная физи-
ка стала «абсолютно неприемлемой для обычного разума». Действи-

тельно ли идеи квантовой механики неприемлемы для «обычного разума»? Я бы не торопился с положительным ответом. Возьмем, например, принцип дополнительности, являющийся по сути дела логической основой квантовой механики...

Бор. Я выдвинул этот принцип в сентябре 1927 года в своем докладе на международном Конгрессе физиков в Комо, посвященном памяти Вольты. В атомной физике слово «дополнительность» употребляют, чтобы характеризовать связь между данными, которые получены при разных условиях опыта и могут быть наглядно истолкованы лишь на основе взаимно исключающих друг друга представлений.

Автор. Вполне возможно, что одновременное использование взаимно исключающих представлений покажется кому-то противоречащим здравому смыслу. А между тем идея представления того или иного объекта с помощью взаимно исключающих друг друга образов отнюдь не нова. Достаточно вспомнить о сказке про Царевну-лягушку. Обычная лягушка и «нормальная» царевна не имеют ничего общего друг с другом и сами по себе не очень-то интересны. Но если они выступают как взаимно дополнительные образы, рождается сказка с неким глубинным смыслом.

Бор. Мы все знаем старое высказывание, гласящее, что если мы пробуем анализировать наши переживания, то мы перестаем их испытывать. В этом смысле мы обнаруживаем, что между психическими опытами, для описания которых адекватно употребляют такие слова, как «мысль» и «чувство», существует дополнительное соотношение, подобное тому, какое существует между данными о поведении атомов, полученными при разных условиях опыта.

Автор. Было бы интересно провести аналогии между идеями квантовой механики и идеями, содержащимися в известных произведениях литературы. Полагаю, что правомерно сопоставлять истину поэтическую с истиной научной.

Бор. Совершенно согласен с этим. Мы не можем миновать вопроса о взаимоотношении между наукой и искусством. Причина, почему искусство может обогатить ученых, заключается в его способности напоминать нам о гармониях, недостижимых для систематического анализа.

Автор. Мне приходит в голову известный роман И.А. Гончарова «Обломов». Я имею в виду внутренние переживания главного героя, который желает действовать и не решается действовать.

Добролюбов. Желания Обломова являются только в форме: «а хорошо бы, если бы вот это случилось». Но как это может сделаться, он не знает. Оттого он любит помечтать и ужасно боится того момента, когда мечтания придут в соприкосновение с действительностью...

Автор. Помнится, Вы проводили аналогию между Обломовым и такими литературными героями, как Онегин, Печорин, Рудин.

Добролюбов. Действительно, проводил. Дело в том, что у них всех одна общая черта — бесплодное стремление к деятельности, сознание, что из них многое могло бы выйти, но не выйдет ничего.

Бор. Тут я бы подчеркнул особенно мучительное отношение между тем душевным опытом, когда мы испытываем чувство решимости, и тем, когда мы сознательно размышляем о мотивах к действию.

Автор. В известном смысле, личная трагедия Обломова — в неспособности разрешить диалектическое противоречие между возможным и действительным. Потенциально в Обломове «заключено» многое, здесь налицо богатая суперпозиция возможностей. Но не происходит того самого «измерительного акта», который за счет разрушения этой суперпозиции позволил бы Обломову реализовать какую-нибудь сторону своей натуры. Нет упомянутого акта, суперпозиция не разрушается, все остается по-старому.

А теперь позвольте другой литературный пример — известная сказка «Золушка». Предоставим слово сочинителю этой сказки. Пожалуйста, то место, где фея провожает Золушку на бал во дворец короля.

Перро. Когда Золушка была готова совсем, фея усадила ее в карету и строго-настрого приказала возвратиться домой до полуночи. — Если ты опоздаешь хоть на одну минуту, — сказала она, — твоя карета снова сделается тыквой, лошади — мышатами, лакеи — ящерицами, а твой пышный наряд опять превратится в старенькое платьице...

Автор. Я хотел бы обратить внимание на тот факт, что всемогущая фея дала Золушке наряды и карету только на время, только до полуночи. А почему не навсегда? Ясно, что она могла бы так сделать, но это нарушило бы внутреннюю логику сказки, ее внутренний смысл. Как говорится, исчезла бы «изюминка». Если на время, то можно, а если навсегда, то нельзя. Разве это не напоминает модель виртуальных квантовых переходов? Нарушены законы сохранения, сокровища созданы, что называется, из «ничего», с помощью волшебной палочки. Однако все это допускается только в течение конечного промежутка времени — до полуночи. Сопоставьте: микрообъект может в течение конечного промежутка времени побывать на новом уровне без затраты энергии извне; при этом обязательно его возвращение на исходный уровень. И вот Золушка совершает «виртуальный переход» между своим жилищем и королевским дворцом, наслаждается танцами и старается проследить, чтобы не был превышен обусловленный промежуток време-

ни... А потом на сцене появляется придворный кавалер с хрустальной туфелькой.

Реппо. Придворный кавалер посмотрел на Золушку и сказал: — Я получил приказание от принца мерить башмачок всем девушкам в городе. Позвольте вашу ножку, сударыня!

Он усадил Золушку в кресло и, надев хрустальный башмачок на ее маленькую ножку, сразу увидел, что больше мерить ему не придется: башмачок был точь-в-точь по ножке. В эту самую минуту дверь отворилась и в комнату вошла фея. Она дотронулась своей волшебной палочкой до бедного платья Золушки, и оно стало еще пышнее и красивее, чем было накануне...

Автор. Итак, свершилось — фея все-таки сделала Золушку нарядной. Теперь уже навсегда. Виртуальные переходы закончились реальным переходом Золушки «на новый уровень». Принц, хрустальный башмачок, придворный кавалер — все они сыграли роль того самого фотона, который, взаимодействуя с квантовой системой, совершающей виртуальные переходы, приводит к реальному переходу.

Разумеется, нельзя всерьез рассматривать сказку «Золушка» как иллюстрацию идеи виртуальных переходов и соотношения неопределенностей для энергии и времени. Точно так же нельзя всерьез рассматривать муки Обломова как иллюстрацию принципа суперпозиции состояний, как пояснение проблемы разрушения суперпозиции в измерительном акте. Наконец, нельзя всерьез рассматривать сказку о Царевне-лягушке как иллюстрацию принципа дополнительности. Однако вполне правомерно усмотреть в приведенных сопоставлениях общность внутренней логики, заставляющую усомниться в справедливости утверждений, что квантовая механика противоречит здравому смыслу.

Бор. Не будет непочтительным заметить, что даже на вершине своего творчества художник полагается на общечеловеческий фундамент, на котором строим и мы.

Автор. Конечно, идеи квантовой механики во многих отношениях непривычны и весьма своеобразны. Но они родились не на пустом месте, а на том основательном фундаменте представлений и понятий, который был создан всем предыдущим опытом человечества. Поэтому отнюдь не случайны, а напротив, закономерны духовные аналогии между физическими моделями и литературными образами.



ТРАНЗИСТОР, ЛАЗЕР, АТОМНЫЙ РЕАКТОР И... ВЕРОЯТНОСТЬ

— Ну какое, скажите на милость, отношение к вероятности могут иметь транзистор, лазер или атомный реактор?

— Самое прямое, коль скоро в их основе лежит квантовая физика.

Из подслушанных разговоров

10.1 ЭЛЕКТРОН ВНУТРИ КРИСТАЛЛА

10.1.1. Энергетические зоны. Представим себе, что N атомов достаточно сильно сблизилась друг с другом, и образовалась пространственная кристаллическая решетка. Что произойдет в данном случае с уровнями энергии, представлявшими состояния электрона в изолированном атоме? Эти уровни были представлены схематически на рисунке 1 в таблице 15. Как и следовало ожидать, при образовании кристалла остаются без изменений достаточно низко расположенные уровни, на кото-

рых находятся электроны внутренних электронных оболочек, весьма сильно связанные в своих атомах. Иное дело электроны внешней оболочки (внешних оболочек). Образно говоря, они перестают быть «собственностью» отдельных атомов, а становятся «собственностью» всего кристалла из N атомов; иными словами, эти электроны *обобществляются кристаллом*. Отвечающие указанным электронам энергетические уровни преобразуются в кристалле в *энергетические зоны*. Можно сказать, что происходит как бы *размытие* (*уширение*) уровней. В пределах зоны энергия электрона изменяется непрерывно.

Зонная структура обобществленных кристаллом электронов вполне закономерно является «промежуточной» между структурой дискретных уровней электрона в изолированном атоме и непрерывным спектром значений энергии для свободного электрона. Движение электрона в изолированном атоме пространственно ограничено размерами атома; движение обобществленного электрона в кристалле пространственно ограничено размерами кристалла (электрон «свободен», но лишь в пределах кристалла); движение свободного электрона пространственно не ограничено.

На рисунке 1а в таблице 18 дана схема уровней энергии электрона в изолированном атоме Na. Пунктирными кривыми изображена потенциальная яма, образованная кулоновским полем атомного ядра. Черные кружочки использованы для представления заполнения одиннадцатую электронами соответствующих уровней (уровней $1s$, $2s$, $2p$, $3s$). Напомним также рисунок 2 из таблицы 15.

На рисунке 1б в таблице 18 можно видеть, как, в общих чертах, изменяется предыдущая картина при переходе от изолированного атома Na к кристаллу натрия (здесь показаны лишь два ближайших атома; a — расстояние между соседними узлами решетки). Мы видим, что уровни $1s$ и $2s$ при переходе к кристаллу фактически не размылись в зоны, уровень $2p$ превратился в узкую зону, уровень $3s$ превратился в относительно широкую энергетическую зону.

Говоря о превращении уровня в зону, мы употребляли термины «размытие» и «уширение». В представленном на рисунке 1б примере с натрием правильнее было бы говорить, что уровни $2p$ и $3s$ *расщепляются на N подуровней*, которые и образовали соответствующие энергетические зоны. Если τ — время жизни обобществленного электрона внутри кристалла, то согласно соотношению неопределенностей для энергии и времени каждый из упомянутых подуровней «размыт» на величину

$\Delta\epsilon \approx \frac{h}{2\pi\tau}$. Именно поэтому можно полагать, что энергия электрона в пределах зоны изменяется непрерывно.

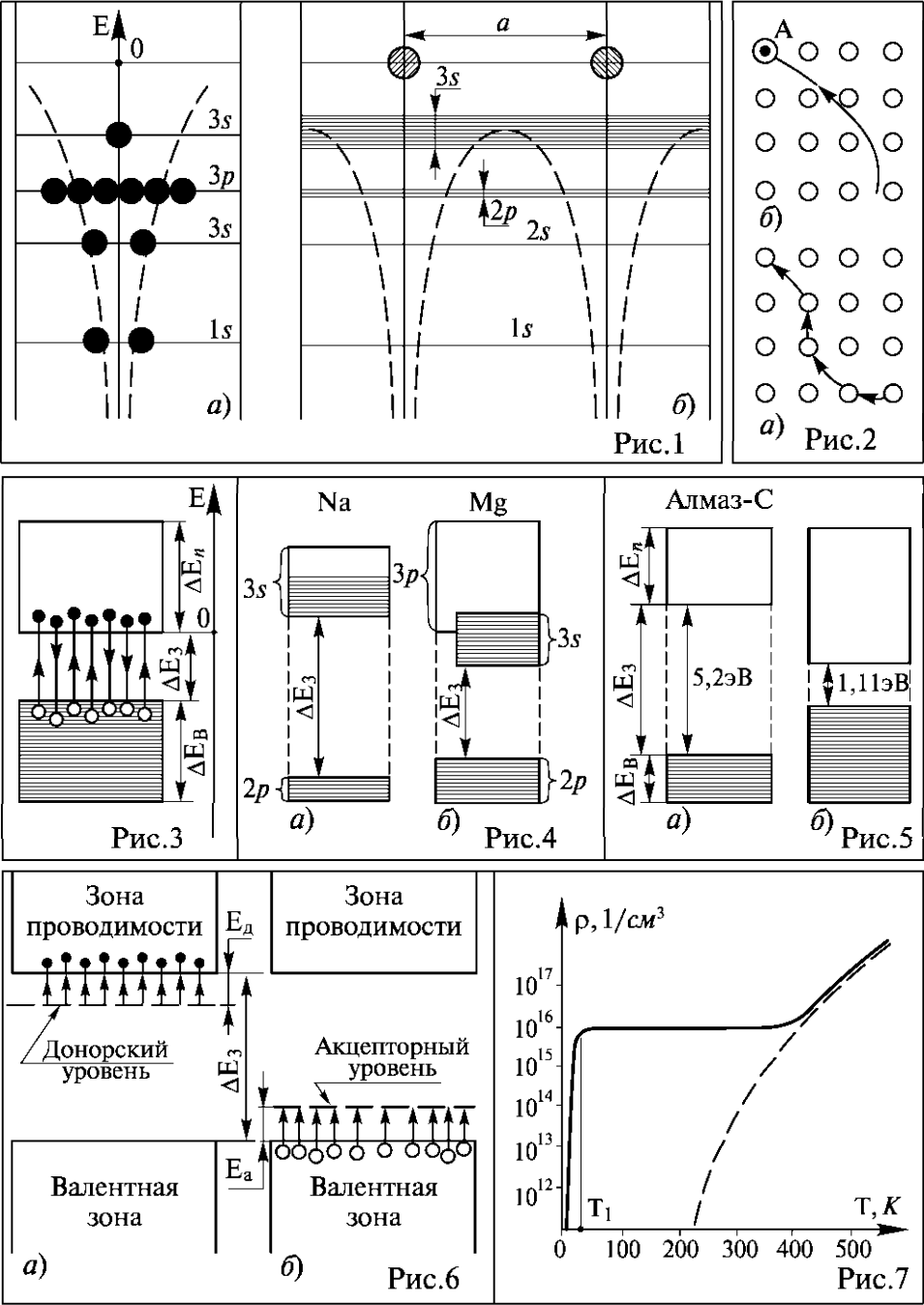
Заметим, что не всегда зоны возникают как результат расщепления *соответствующих* уровней. Та или иная зона может «происходить» от нескольких уровней. Одна и та же пара уровней может совместно «породить» две разных энергетических зоны (например, в алмазе уровни $2s$ и $2p$ порождают две разных зоны, называемые s - p -гибридами; одна из них полностью заполнена электронами, а другая, напротив, полностью свободна). Так или иначе, но всегда *энергетическая зона оказывается состоящей из большого числа слегка уширенных уровней*. Каждому из подуровней соответствуют два состояния электрона (отвечающие двум разным ориентациям спина электрона); поэтому на каждом подуровне могут находиться, согласно принципу запрета Паули, не более двух электронов.

10.1.2. Обобществленные электроны. Понятие «электрон, обобществленный кристаллом» нуждается в пояснениях. Было бы неправильно представлять такой электрон как частицу с некоторой *траекторией*, проходящей внутри кристалла. Подобные траектории иногда изображают в целях наглядности, грубо искажая тем самым физическую сущность явления. На рисунке 2а в таблице 18 обобществленный электрон рассматривается как «частица», которая перемещается от узла к узлу решетки и некоторое время «находится» вблизи каждого из узлов (образно говоря, «погостит» у одного узла, затем у другого, третьего и т. д.). Здесь легко объяснить, почему возникает энергетическая зона, — достаточно сослаться на соотношение неопределенностей для энергии и времени. Если, например, принять, что вблизи того или иного определенного узла обобществленный электрон «находится» время $\tau \approx 10^{-15}$ с,

то его энергия должна иметь неопределенность $\Delta E \approx \frac{h}{2\pi\tau} \approx 4$ эВ. Вот и получается зона шириной 4 эВ. Правда, такая «зона» выглядит не более как «размытие» энергетического уровня; она не разбивается на подуровни, а значит, и на состояния электрона. На рисунке 2б в таблице 18 обобществленный электрон, движущийся между узлами решетки, «натыкается» на примесный атом А и захватывается им.

В действительности, однако, обобществленный электрон отнюдь не «гостит» поочередно вблизи разных узлов решетки. В кристалле с идеальной решеткой (отсутствуют примесные атомы и какие-либо нарушения периодической структуры) обобществленный электрон движется, «не замечая» *ионов решетки*. Захват электрона примесным атомом есть не что иное, как акт *локализации* микрообъекта, который до этого был делокализован и *мог быть обнаружен с равной вероятностью вблизи любого узла кристаллической решетки*.

Таблица 18. Зонная структура энергетических состояний электронов в кристаллах



Специфика обобществленных электронов хорошо проявляется, если рассмотреть энергетическую зону, *полностью заполненную* такими электронами. Они вполне свободно перемещаются по кристаллу и, однако, не могут в данном случае участвовать в направленном переносе заряда под действием внешнего электрического поля. Они не могут обеспечивать электропроводность кристалла. Дело в том, что появление в кристалле электрического тока предполагает соответствующие *смещения электронов по шкале энергий*, т. е. изменения энергии электронов. Однако в полностью заполненной зоне все энергетические состояния *заняты*, и поэтому изменения энергии тех или иных электронов оказываются невозможными. Когда говорят о переходах обобществленных электронов, то имеют в виду переходы не *в пространстве*, а *по шкале энергий*. Электроны отнюдь не «заперты» в каких-то участках пространства, они участвуют в движениях, охватывающих весь кристалл. Но зато они могут быть «заперты» в пространстве энергий. И именно поэтому такие электроны не могут участвовать в направленном переносе заряда.

10.1.3. Электроны проводимости и дырки. На рисунке 3 в таблице 18 представлены две энергетические зоны (они выделены с помощью прямоугольников). Нижняя зона при температуре $T = 0^\circ\text{K}$ *полностью заполнена*, а верхняя, напротив, *полностью свободна*. Нижнюю зону принято называть *валентной зоной* (обозначим ее ширину по шкале энергий через ΔE_B); верхнюю зону принято называть *зоной проводимости* (обозначим ее ширину через ΔE_n). Энергетический промежуток между указанными зонами называют *запрещенной зоной* (ее ширину обозначим через ΔE_3). Заметим, что «запрещенная зона» — это не энергетическая зона, а всего лишь интервал значений энергии, не реализуемых обобществленными электронами.

Теперь предположим, что $T \neq 0$. За счет внутренней энергии кристалла какие-то электроны, находившиеся вблизи вершины валентной зоны, могут совершить *квантовые скачки из валентной зоны в зону проводимости*. Чем выше температура кристалла, тем больше вероятность таких переходов. Оказавшийся в зоне проводимости электрон способен, очевидно, участвовать в направленном переносе заряда, поскольку теперь «к его услугам» сколько угодно свободных энергетических состояний. Обобществленные электроны, оказавшиеся в зоне проводимости, называют *электронами проводимости*.

В результате рассматриваемых квантовых переходов часть состояний в зоне проводимости *окажутся занятыми*, а такое же число состояний в валентной зоне *окажутся свободными*. Оставшиеся в валентной зоне

обобществленные электроны могут занимать освободившиеся состояния; в результате они приобретают некоторую «свободу» в энергетическом отношении и могут вносить вклад в электропроводность кристалла (наряду с электронами проводимости).

Удобно пользоваться в данном случае «языком» состояний. Электрон проводимости — это *занятое состояние в зоне проводимости*. Свободное (правильнее сказать: освободившееся) состояние в валентной зоне назовем условно *дыркой*. Использование вместо электронов в зонах их состояний (заполненных или свободных) позволяет нам воспользоваться *симметрией* между зоной проводимости и валентной зоной: *в зоне проводимости занятые состояния перемещаются на фоне свободных состояний, а в валентной зоне свободные состояния перемещаются на фоне занятых*. Существенно, что статистика занятых состояний в зоне проводимости оказывается аналогичной статистике свободных состояний в валентной зоне.

Заметим, что «подмена» микрообъектов состояниями оказалась возможной только потому, что эти микрообъекты (электроны) являются фермионами. Между фермионом и его состоянием есть соответствие: либо состояние занято одним единственным фермионом, либо, напротив, свободно. Невозможно было бы установить соответствие между бозоном и его состоянием, коль скоро в любом состоянии могут находиться сколько угодно бозонов.

Итак, будем сопоставлять занятые состояния в зоне проводимости с электронами проводимости, а свободные состояния в валентной зоне с некими «частицами», которые назовем дырками. На рисунке 3 в таблице 18 электроны проводимости изображены черными кружочками, а дырки — пустыми кружочками. Понятно, что $\rho_n = \rho_p$, где ρ_n — концентрация электронов проводимости, а ρ_p — концентрация дырок.

Когда обобщенный электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости, происходит, как принято говорить, *рождение пары электрон–дырка*. Спонтанно совершаются переходы также и другого типа, — когда электрон проводимости скачком возвращается в валентную зону. Принято говорить, что в этом случае происходит *рекомбинация электрона и дырки*. На рисунке 3 в таблице 18 переходы с рождением пары электрон–дырка изображены стрелками, направленными вверх, а обратные переходы (с рекомбинацией электрона и дырки) — стрелками, направленными вниз. Энергия, освобождающаяся при рекомбинации электрона и дырки, превращается в тепловую энергию кристалла, но может также превратиться в энергию излучения. В последнем случае говорят об *излучательной рекомбинации*.

Подчеркнем, что как материальный объект дырка не существует. Просто введение понятия дырки упрощает рассмотрение статистических свойств полупроводника. Можно было бы не вводить этого понятия и рассматривать коллектив обобществленных электронов, оставшихся в валентной зоне. Однако такое рассмотрение крайне сложно. Оно не использовало бы симметрии между зоной проводимости и валентной зоной. Аналогией дырки может служить движение пузырька воздуха в воде. В действительности перемещается вода, однако удобнее рассматривать не перемещение воды, а перемещение пузырька как некоего самостоятельного объекта.

Дырка имеет *положительный* заряд, равный по величине заряду электрона. Заряд обобществленного электрона (в частности, электрона проводимости) — такой же, что и заряд свободного электрона. Масса электрона проводимости отличается от массы свободного электрона; в связи с этим используют термин «*эффективная масса*». В германии, например, $m_n = 0,25m$ и $m_p = 0,3m$, где m_n — эффективная масса электрона проводимости, m_p — эффективная масса дырки, m — масса покоя свободного электрона.

10.2 МЕТАЛЛЫ И НЕМЕТАЛЛЫ. ДИЭЛЕКТРИКИ И ПОЛУПРОВОДНИКИ

Все твердые тела по их физическим (прежде всего, электрическим) свойствам разделяют на *металлы* и *неметаллы*. Неметаллы разделяют, в свою очередь, на *диэлектрики* и *полупроводники*.

У *металлов* над полностью заполненными энергетическими зонами расположена зона, *заполненная электронами частично*. Такая зона образуется, если соответствующий уровень энергии в изолированном атоме был заполнен не полностью (щелочные металлы) или если наложились одна на другую зона, отвечающая полностью заполненному уровню в атоме, и зона, отвечающая уровню, не содержащему электронов (щелочноземельные металлы). На рисунке 4 в таблице 18 приведены два примера — для Na (щелочной металл) и для Mg (щелочноземельный металл). У Na частично заполненная зона образуется в результате расщепления наполовину заполненного уровня $3s$, а в Mg — в результате расщепления заполненного уровня $3s$ и пустого уровня $3p$. Высокая электропроводность металлов объясняется наличием частично заполненной зоны. Носителями тока являются здесь электроны в этой зоне, поскольку в ней имеется много свободных энергетических состояний.

У *неметаллов* при $T = 0$ К нет частично заполненных энергетических зон. За последней полностью заполненной зоной сразу идет полностью свободная зона. Первую называют *валентной зоной*, а вторую *зоной проводимости*; мы познакомились с ними в разделе 10.1.3. В зависимости от величины промежутка между указанными зонами (в зависимости от ширины ΔE_3 запрещенной зоны) неметаллы разделяют на *диэлектрики* и *полупроводники*.

У типичных диэлектриков $\Delta E_3 > 4$ эВ. У полупроводников ΔE_3 находится в пределах приблизительно от 2 эВ до 0,2 эВ. В качестве примера приведем значения ΔE_3 для ряда полупроводников: 0,66 эВ у германия, 1,11 эВ у кремния, 1,79 эВ у селена, 1,43 эВ у арсенида галлия (GaAs), 0,36 эВ у арсенида индия (InAs), 0,18 эВ у антимонида индия (InSb). На рисунке 5 в таблице 18 приведены для примера зоны в алмазе (ярко выраженный диэлектрик) и в кремнии (полупроводник).

Электропроводность диэлектриков в обычных условиях практически отсутствует, поскольку из-за относительно большой ширины запрещенной зоны весьма мала вероятность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости. У полупроводников электропроводность *существенно зависит от температуры*. С увеличением T быстро возрастает вероятность междוזонных квантовых переходов, в результате чего растет концентрация носителей как одного, так и другого знака (как p_n , так и p_p). Еще со времен Фарадея было известно, что, в отличие от металлов, у полупроводников электропроводность с нагреванием не снижается, а напротив, быстро растет. Этот удивительный факт получил объяснение лишь во второй четверти XX столетия — в рамках квантовой теории.

Существенно, что электропроводность полупроводников зависит также от *наличия в кристалле примесных атомов*. Примеси могут обуславливать появление в пределах запрещенной зоны одного или более *примесных энергетических уровней*. Заметим, что электрон в примесном атоме — это не обобществленный электрон; он локализован в атоме (потому и возникает дополнительный уровень, а не зона). Рассмотрим два случая; их иллюстрирует рисунок 6 в таблице 18. В случае (а) примесный уровень находится вблизи «дна» зоны проводимости на расстоянии E_d порядка 0,01 эВ от него. Такой уровень образуется, когда примесный атом имеет на внешней оболочке на один электрон больше, чем основной атом кристалла (валентность примесного атома на единицу больше валентности основного). Избыточные электроны примесных атомов как раз и находятся на примесном уровне. Впрочем, слово «находятся» не вполне годится, поскольку уже при небольших температурах (порядка всего лишь 10 К) электроны с этого уровня перескакивают в зону проводимости, т. е. обобществляются кристаллом (при этом,

конечно, дырки в валентной зоне не образуются). Поэтому подобные примесные полупроводники, а также примесные уровни в них называют *донорными* (примесный уровень играет здесь роль донора — он снабжает электронами зону проводимости). Примером может служить полупроводниковый кристалл германия с примесью мышьяка (напомним, что германий четырехвалентен, а мышьяк пятивалентен).

В случае (б) на рисунке 6 примесный уровень находится вблизи «вершины» валентной зоны (на расстоянии E_d порядка 0,01 эВ). Он образуется в полупроводниках с примесными атомами, имеющими на внешней оболочке на один электрон меньше, чем основные атомы (валентность примесного атома на единицу меньше валентности основного). Электроны валентной зоны переходят на примесный уровень, т. е. захватываются примесными атомами; при этом в зоне появляются дырки. Подобные полупроводники и примесные уровни называют *акцепторными*. Примесный уровень выступает здесь в роли акцептора (захватчика) — он захватывает электроны из валентной зоны (и тем самым снабжает ее дырками). Примером может служить германий с примесью трехвалентного бора.

Донорные примесные уровни *истощаются*, а акцепторные насыщаются электронами обычно при температурах уже около 70 К. При дальнейшем увеличении температуры кристалла в игру постепенно включаются междзональные переходы — как и в беспримесных полупроводниках. При переходах *донорный уровень* → *зона проводимости* рождаются только отрицательно заряженные носители тока (электроны проводимости), а при переходах *валентная зона* → *акцепторный уровень* рождаются только положительно заряженные носители тока (дырки). При *междзональных* переходах как те, так и другие носители тока рождаются в одинаковом количестве. В итоге в донорных полупроводниках всегда больше электронов проводимости, чем дырок, а в акцепторных — наоборот; разница тем сильнее, чем больше примесных атомов в единице объема кристалла. Поэтому донорные полупроводники называют также *полупроводниками n-типа* (negative — отрицательный), а акцепторные — *полупроводниками p-типа* (positive — положительный).

На рисунке 7 в таблице 18 приведена зависимость концентрации носителей тока от температуры в донорном полупроводнике. Сплошной кривой изображена зависимость $\rho_n(T)$, а пунктирной — зависимость $\rho_p(T)$; T_s — температура истощения примесей. При очень низких температурах (меньше температуры T_s) концентрация ρ_n быстро растет вследствие переходов с донорного уровня в зону проводимости. Затем на графике мы наблюдаем, что ρ_n не изменяется примерно вплоть до 400 К. На самом деле возрастание ρ_n продолжается (теперь уже только за счет междзональных переходов), но проявляется это на графике лишь

при достаточно высоких температурах. Мы не замечаем на данном графике вклада со стороны междузонных переходов вплоть до температуры около 400 К по той причине, что здесь используется *логарифмическая шкала* для значений концентрации носителей тока.

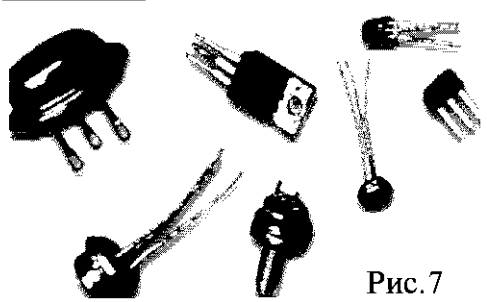
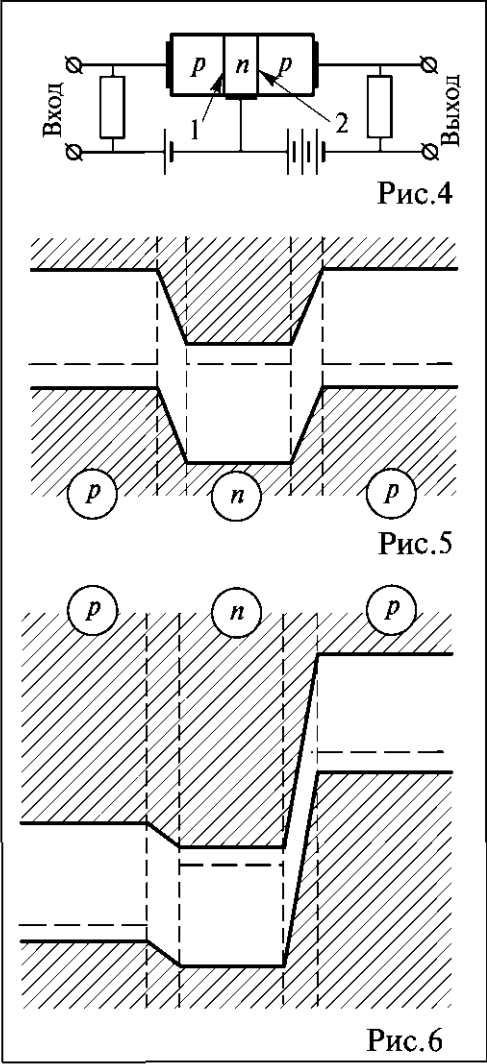
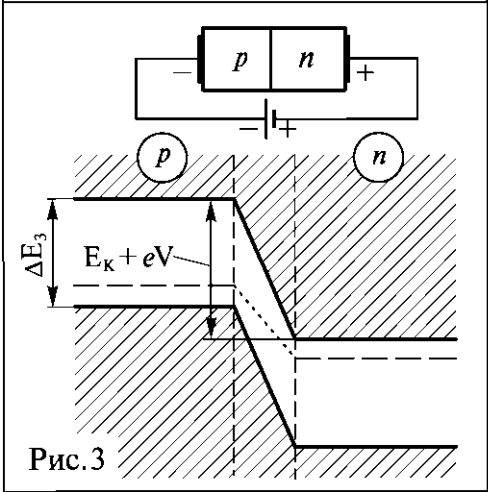
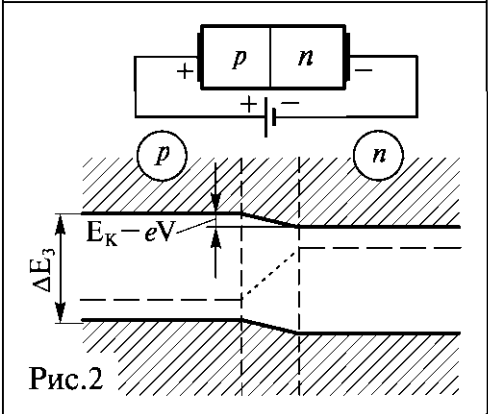
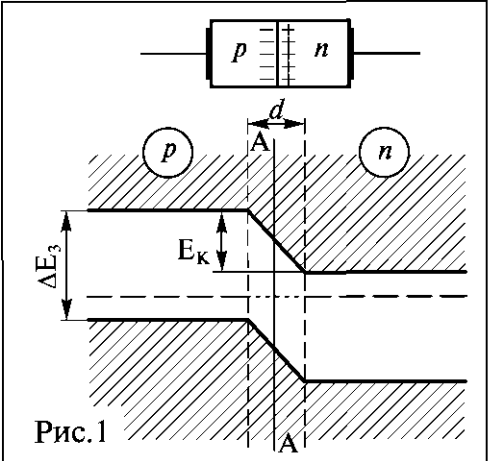
Заметим, что в случае акцепторного полупроводника мы получили бы такую же картину, что и на рисунке 7, но только теперь под сплошной кривой следовало бы понимать зависимость $\rho_p(T)$, а под пунктирной — зависимость $\rho_p(T)$.

10.3 ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

Электронно-дырочным переходом (проще говоря, *p-n-переходом*) называют область полупроводника, в которой имеет место пространственное изменение типа проводимости — от электронной к дырочной (или наоборот). Проще говоря, *p-n-переход* — это контакт *n*-полупроводника и *p*-полупроводника. Реализовать *p-n-переход* непосредственным соприкосновением двух полупроводников разного типа практически невозможно. Его получают путем *диффузии* акцепторной примеси в некоторую область полупроводника донорного типа либо диффузии донорной примеси в некоторую область полупроводника акцепторного типа. Получают *p-n-переход* также *эпитаксиальным методом* — осаждая из газа или жидкости пленку полупроводника одного типа на подложку полупроводника другого типа.

При образовании *p-n-перехода* электроны проводимости из *n*-полупроводника, где их в миллионы раз больше, чем в *p*-полупроводнике, начинают переходить через область контакта в *p*-полупроводник; в обратном направлении будет происходить массовый переход дырок. В результате *n*-полупроводник заряжается положительно, а *p*-полупроводник отрицательно; между полупроводниками возникает так называемая *контактная разность потенциалов* V_k , создающая энергетический порог высотой $E_k = eV_k$, где e — величина заряда электрона (дырки). Этот порог препятствует дальнейшему нескомпенсированному переходу электронов в *p*-полупроводник и дырок в *n*-полупроводник. Рисунок 1 в таблице 19 иллюстрирует рассматриваемую ситуацию. Здесь слева энергетические зоны *p*-полупроводника, а справа — *n*-полупроводника; горизонтальные пунктирные прямые — примесные уровни полупроводников. Между вертикальными пунктирными прямыми сосредоточен двойной слой пространственного заряда толщиной d — отрицательные

Таблица 19. Электронно-дырочный переход и транзистор



заряды слева от вертикали AA (в p -полупроводнике) и положительные справа от вертикали AA (в n -полупроводнике).

Предположим, что к p - n -переходу приложено напряжение V в *прямом направлении* (плюс к p -полупроводнику и минус к n -полупроводнику); такой переход называют *прямым*. В этом случае высота энергетического порога *уменьшится* — она станет равной $E_k - eV$; через переход потечет ток. Прямой p - n -переход иллюстрирует рисунок 2 в таблице 19. Если же к переходу приложить напряжение в *обратном направлении* (*обратный* переход), то энергетический порог, напротив, *возрастет* — он станет равным $E_k + eV$. Ясно, что ток через обратный переход не течет; переход заперт. Обратный p - n -переход иллюстрирует рисунок 3 в таблице 19. Прикладывая к p - n -переходу напряжение в прямом направлении, мы как бы открываем переход, а в обратном — запираем. Отсюда видно, что p - n -переход может служить, например, выпрямителем переменного электрического тока.

10.4 ТРАНЗИСТОР

Транзисторы — полупроводниковые приборы для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний, выполненные на основе монокристалла полупроводника (кремния или германия), содержащего не менее трех областей с различной проводимостью. Изобрели транзистор в 1948 году американские физики *Уильям Брэдфорд Шокли* (1910–1989), *Уолтер Браттейн* (1902–1987), *Джон Бардин* (1908–1991).

Ограничимся знакомством с *плоскостным p - n - p -транзистором*. Он образован двумя p -полупроводниками и расположенным между ними n -полупроводником, т. е. содержит два p - n -перехода. (Можно было бы также взять n - p - n -транзистор: два p -полупроводника и между ними n -полупроводник.) Рассмотрим электрическую схему, изображенную на рисунке 4 в таблице 19. Здесь: 1 — прямой переход, 2 — обратный переход; левый полупроводник называют *эмиттером*, правый — *коллектором*, n -полупроводник называют *базой*. На рисунке 5 в той же таблице изображены энергетические зоны полупроводников в случае, когда ни на эмиттер, ни на коллектор напряжение не подано (напомним рисунок 1). На рисунке 6 изображены зоны при наличии напряжения в схеме. Через прямой переход 1 из эмиттера в базу переходят дырки. Существенно, что толщина базы весьма мала (измеряется сотыми и даже тысячными долями сантиметра). Поэтому инжектированные в базу из

эмиттера дырки проскакивают базу и попадают в коллектор, создавая ток в цепи коллектора. Напряжение, создаваемое батареей цепи коллектора, значительно больше напряжения в цепи эмиттера. Поэтому относительно слабый сигнал, подаваемый на вход схемы (в цепь эмиттера), превращается в усиленный сигнал на выходе схемы. Усиление происходит по напряжению и мощности.

В отличие от электронных ламп, усилители на транзисторах не имеют накаливаемого катода. Кроме того, они в десятки и сотни раз меньше по размерам и по массе и работают при более низких напряжениях. Недаром транзисторы получили широкое применение в электронике, практически полностью вытеснив электронные лампы. На рисунке 7 показан внешний вид нескольких типов транзисторов.

Можно сказать, что транзисторы произвели подлинную революцию в электронике: они предопределили появление *микроэлектроники* — современной электроники, основанной на использовании микроминиатюрных электронных устройств, называемых *интегральными схемами*. Полупроводниковые интегральные схемы изготавливают из особо чистых монокристаллов кремния и германия, в которых перестраивают структуру кристалла таким образом, что отдельные его области становятся определенными элементами сложной системы. Маленькая полупроводниковая пластинка размерами 1 мм × 1 мм превращается в самый сложный электронный прибор, заменяющий радиотехнический блок из ста и более обычных деталей. Существуют интегральные схемы, содержащие в одном кристалле полупроводника тысячи элементов (так называемые *большие интегральные схемы*).

10.5 МОЖЕТ ЛИ СВЕТ УСИЛИВАТЬСЯ, ПРОХОДЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО?

Как известно, при прохождении через вещество свет ослабляется. Однако возможно также *усиление* света. Допустим, что имеется коллектив атомов, характеризующихся энергетическими уровнями E_1 и E_2 (будем полагать, что $E_1 < E_2$): при этом N_1 атомов находятся на уровне E_1 , а N_2 атомов находятся на уровне E_2 . Пусть через данный коллектив атомов распространяется световой пучок, состоящий из фотонов с энергией $h\nu_{12} = E_2 - E_1$. Атомы, находящиеся на уровне E_1 , могут поглотить по фотону и перейти на уровень E_2 — это способствует ослаблению светового пучка. Атомы, находящиеся на уровне E_2 , могут под воздействием фотонов пучка перейти на уровень E_1 с испусканием фотона $h\nu_{12}$. Это есть предсказанный Альбертом Эйнштейном еще в 1916 году процесс *индуцированного (вынужденного) испускания* излучения (см. § 8.4 и рисунок 6 из таблицы 12); он связан с бозонностью фотонов. Понят-

но, что индуцированное испускание способствует усилению светового пучка. Уже в работах Эйнштейна было показано, что отнесенное к единице времени число переходов $E_1 \rightarrow E_2$ есть $n_{12} = B_{12}N_1\rho$, а число инициированных светом переходов $E_2 \rightarrow E_1$ есть $n_{21} = B_{21}N_2\rho$, где ρ — плотность светового пучка на частоте ν_{12} , а B_{12} и B_{21} — некоторые постоянные (их позднее стали называть *коэффициентами Эйнштейна*; можно считать, что $B_{12} = B_{21}$). Чтобы усиление светового пучка за счет вынужденного испускания преобладало над поглощением пучка вследствие поглощения фотонов атомами, необходимо, очевидно, выполнение неравенства $n_{21} > n_{12}$. В свою очередь, это означает, что должно выполняться неравенство $N_2 > N_1$ (число атомов на уровне N_2 должно быть больше числа атомов на уровне N_1). Обычно, чем выше уровень энергии, тем меньше на нем атомов; поэтому-то обычно световой пучок ослабляется, проходя через вещество. Следовательно, *для усиления пучка надо создать необычную ситуацию — когда число атомов на более высоком уровне больше, чем на нижнем*. Как говорят, надо создать *инверсную (обращенную) заселенность* энергетических уровней в веществе.

Итак, надо пропускать световой пучок через среду с инверсной заселенностью уровней. Для приготовления такой среды можно воспользоваться, например, вспомогательным излучением, которое перебросит часть атомов на верхние уровни. Возможны также иные пути возбуждения атомов, скажем, электрический разряд в газе.

Идея усиления электромагнитного излучения в веществе с инверсной заселенностью уровней впервые была высказана *В.А. Фабрикантом* в 1939 году. В 1951 году В.А. Фабрикант, М.М. Вудынский и Ф.А. Бутаев получили Авторское свидетельство на изобретение, в котором под рубрикой «Предмет изобретения» было записано: «Способ усиления электромагнитных излучений (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазонов волн), отличающийся тем, что усиливаемое излучение пропускают через среду, в которой с помощью вспомогательного излучения или другим путем создают избыточную по сравнению с равновесной концентрацию атомов, других частиц или их систем на верхних энергетических уровнях, соответствующих возбужденным состояниям».

10.6 ФИЗИКА ЛАЗЕРА

Принципиальная схема *лазера* (генератора оптического излучения, характеризующегося высокой направленностью и большой плотностью энергии) весьма проста. Она показана на рисунке 1 в таблице 20. Здесь: *АЭ* — активный элемент, *УН* — устройство накачки активного элемен-

та, *ОЗ* — полностью отражающее зеркало резонатора, *ВЗ* — выходное зеркало резонатора, являющееся частично прозрачным, *ЛИ* — лазерное излучение.

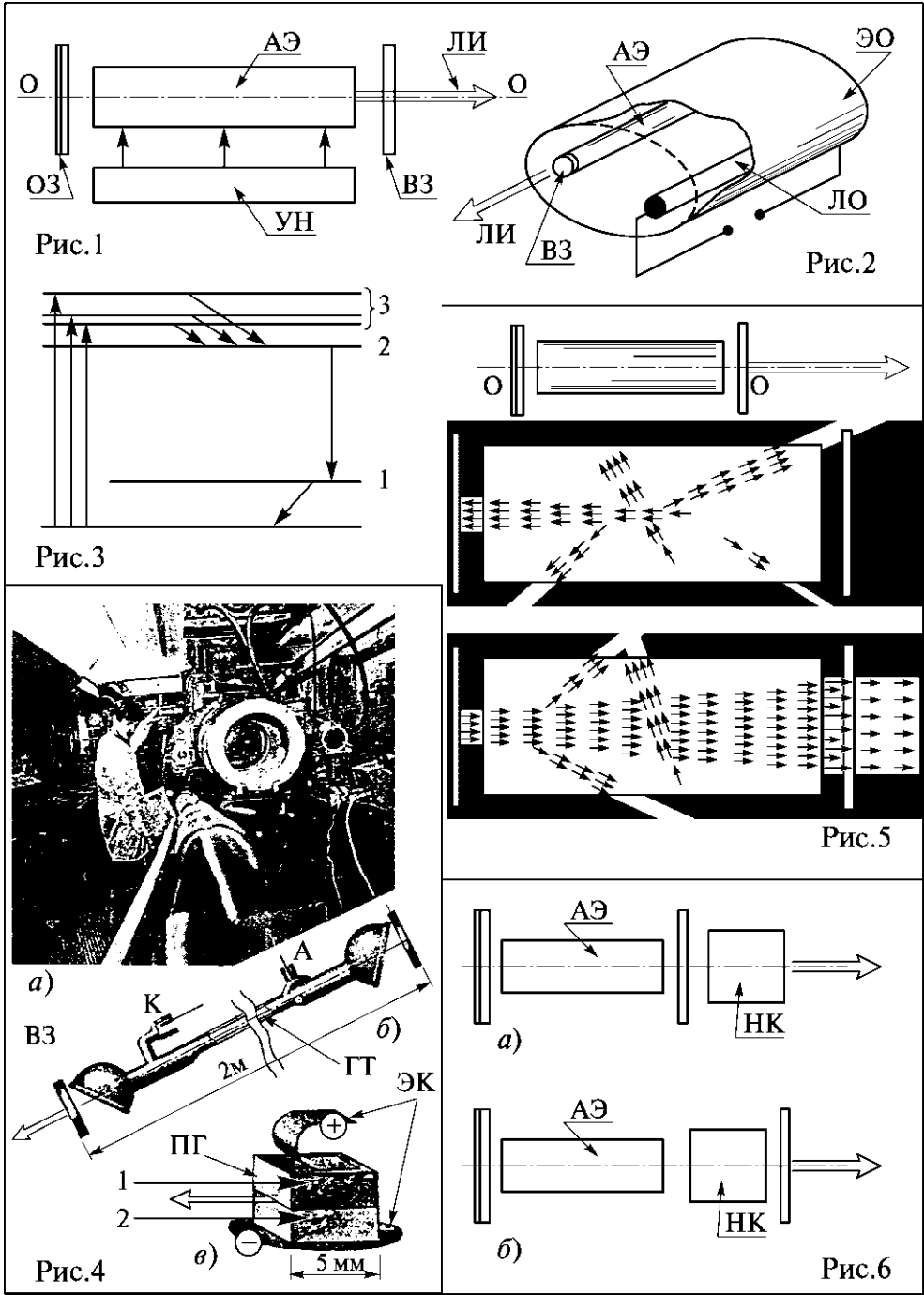
«Сердце» лазера — это его *активный элемент*. Он отдаленно напоминает кекс с изюмом. «Изюминками», или *активными центрами*, являются ионы (атомы, молекулы), обладающие следующим свойством: оказавшись под действием накачки на одном из своих верхних энергетических уровней, они могут относительно долго оставаться там, не торопясь спонтанно соскочить на нижние уровни. Поэтому в процессе накачки активного элемента можно накопить достаточно много активных центров на таком уровне — так, что их окажется там значительно больше, чем на нижних уровнях. В результате будет создана *инверсная заселенность уровней*, что, как мы уже знаем, необходимо для преобладания вынужденного испускания света над его поглощением.

Для примера возьмем конкретный активный элемент — *гранат с неодимом*. Гранат (точнее, иттриево-алюминиевый гранат $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) представляет собой прозрачный кристалл; активные центры (ионы неодима Nd^{3+}) вводятся в кристалл в качестве примеси в процессе изготовления активного элемента. В общих чертах устройство лазера на гранате с неодимом показано на рисунке 2 в таблице 20. Активный элемент *АЭ* и газоразрядная лампа-осветитель *ЛО* помещены внутрь эллиптического отражателя *ЭО*. При рассмотрении лазера в поперечном разрезе отражатель *ЭО* есть эллипс, в фокусах которого находятся активный элемент и лампа-осветитель. Зеркалами резонатора служат специально обработанные торцы активного элемента; один из них является выходным зеркалом *ВЗ*, из которого выходит лазерное излучение *ЛИ*.

На рисунке 3 в таблице 20 показана упрощенно система уровней иона неодима в гранате. Поглощая излучение лампы-осветителя, ионы неодима возбуждаются: переходят на уровни 3. Достаточно скоро они соскакивают с этих уровней и накапливаются на уровне 2, отдавая избыток энергии на нагревание кристалла. Активный элемент готов к работе тогда, когда на уровне 2 накопится значительно больше ионов неодима, чем их имеется на уровне 1. Теперь достаточно «сигнала», роль которого сыграет фотон с энергией, равной $E_2 - E_1$, чтобы произошел дружный переход ионов неодима с уровня 2 на уровень 1. В результате возникнет лавина фотонов, которая и будет представлять собой лазерное излучение.

Говоря о возбуждении активных центров, используют термин «накачка» (активные центры как бы накачиваются энергией, накапливаясь на соответствующем уровне). В нашем примере использовалась *опти-*

Таблица 20. Лазер



ческая накачка. Возможна оптическая накачка мощными световыми импульсами, генерируемыми лампой-вспышкой: в ответ на каждый импульс накачки возникает импульс лазерного излучения (*импульсная оптическая накачка*). Возможно также непрерывное облучение активного элемента (*непрерывная накачка*); в этом случае лазерное излучение может представлять собой непрерывный луч или регулярную последовательность световых импульсов.

Лазеры с активными элементами в виде специально изготовленных кристаллических или стеклянных стержней называют *твердотельными*. Существуют также другие типы лазеров. Среди них отметим *газоразрядные* и *полупроводниковые* лазеры. В газоразрядных лазерах активный элемент — специально подобранная смесь газов; роль активных центров играют определенные атомы, ионы или молекулы, входящие в эту смесь. Так, в *лазере на гелии и неоне* активными центрами служат атомы иона, в *CO₂-лазере* активными центрами являются молекулы углекислого газа. Для накачки газоразрядных лазеров используют *электрический разряд*. На рисунке 4а в таблице 20 представлен сверхмощный CO₂-лазер Института лазерной физики Сибирского отделения РАН в Новосибирске. На рисунке 4б в той же таблице показано, как выглядит широко используемый на практике маломощный гелий-неоновый лазер. Здесь: *ГТ* — газоразрядная трубка, *К* — катод, *А* — анод, *ВЗ* — выходное зеркало резонатора. Полупроводниковые лазеры накачивают оптически, бомбардировкой электронным пучком, но чаще за счет энергии внешнего электрического поля, приложенного к *p-n*-переходу (*инжекционные лазеры*). На рисунке 4в показан инжекционный лазер. Здесь: *1* — *p*-полупроводник, *2* — *n*-полупроводник, *ПГ* — полированная грань кристалла полупроводника, играющая роль выходного зеркала.

Но вернемся к физике процессов в лазере. Итак, накачка обеспечивает инверсную заселенность уровней активных центров. Если теперь направить через активный элемент световой пучок соответствующей частоты, то он будет не ослабляться, а усиливаться. Это и происходит в приборах, называемых *квантовыми усилителями света*. Лазер же является не усилителем, а *генератором* света; здесь нет первичного светового пучка. Поэтому важно понять, как же начинается или, точнее говоря, *зарождается* генерация лазерного излучения.

Все начинается со *спонтанного испускания света* (подчеркнем: с принципиально стохастического, т. е. вероятностного процесса). Роль первичных фотонов, инициирующих испускание новых (вторичных) фотонов и тем самым дающих начало процессу лазерной генерации, играют фотоны, случайно родившиеся при спонтанных переходах активных центров с уровня 2 на уровень 1. Каждый спонтанно родившийся фотон может, в принципе, инициировать рождение целой лавины вторичных фотонов, летящих в том же направлении, что и первичный фотон

(напомним, что при вынужденном испускании вторичный фотон полностью копирует первичный).

Тут у читателя может возникнуть вопрос. Поскольку спонтанно рождающиеся фотоны испускаются активными центрами в самых разных направлениях, то в разных направлениях «побегут» и соответствующие лавины вторичных фотонов. Каким же образом возникает *лазерный луч*?

Недоумение читатели совершенно понятно. Чтобы получить лазерный луч, нужно как-то *упорядочить* описанную выше картину. Это делает *оптический резонатор* лазера. В простейшем случае он представляет собой два зеркала с общей *оптической осью*, фиксирующей в пространстве направление лазерного луча (на рисунках 1 и 5 в таблице 20 это есть ось *ОО*). Активный элемент находится между зеркалами. Спонтанные фотоны, случайно родившиеся в направлении *ОО*, будут проходить внутри активного элемента относительно длинный путь, который, к тому же, *многократно увеличивается* вследствие отражений излучения от зеркал. Взаимодействуя с возбужденными активными центрами, эти фотоны инициируют, в конечном счете, мощную лавину вынужденно испущенных фотонов, представляющую собой лазерный луч. Что же касается тех спонтанных фотонов, которые родились в *иных* направлениях (направлениях, *отличающихся* от направления оптической оси *ОО*), то они пройдут внутри активного элемента сравнительно короткий путь и «выйдут из игры». Это схематически показано на рисунке 5 в таблице 20.

Таким образом, зеркала оптического резонатора выделяют в пространстве *определенное направление*, вдоль которого реализуются наиболее благоприятные условия для развития фотонных лавин. Это и есть направление лазерного луча; он выходит из резонатора через одно из зеркал. Оптический резонатор играет принципиально важную роль: упорядочивает бурно развивающиеся в активном элементе процессы вынужденного испускания, направляет их в «нужное русло», и в итоге *формирует лазерное излучение*.

В разделе 9.10.3 была высказана мысль о перспективности использования *интерференции явлений* для тех или иных ситуаций. В связи с этим обратимся к рисунку 6 в таблице 20. Здесь приведены две оптические схемы: а) схема для *внерезонаторной* генерации второй оптической гармоники, б) схема для *внутрирезонаторной* генерации второй оптической гармоники (*АЭ* — активный элемент, *НК* — нелинейный кристалл: устройство накачки не изображено). В первой схеме *сначала* лазер генерирует излучение на некоторой частоте (первая гармоника), которое *затем* проходит через нелинейный кристалл, где частично преобразуется в излучение на удвоенной частоте (вторая гармоника). Здесь сначала

реализуется явление генерации первой гармоники, а затем наблюдается явление генерации второй гармоники. Во второй схеме оба указанных явления происходят одновременно внутри оптического резонатора, так что здесь можно говорить об интерференции явлений. В результате интенсивность второй гармоники оказывается больше, чем при использовании первой схемы.

Историческая справка. Вначале были созданы квантовые генераторы излучения в СВЧ-диапазоне; их назвали *мазерами*. Это произошло в 1954 году. Изобретателями мазера оказались видные российские физики академики *Николай Геннадьевич Басов* (1922–2001) и *Александр Михайлович Прохоров* (1916–2002) и независимо от них американский физик *Чарлз Таунс* (1915–1995). Первый оптический квантовый генератор (лазер) был создан в 1960 году американским физиком *Т. Мейманом*. Это был *лазер на рубине* (активный элемент — кристалл Al_2O_3 , активированный ионами Cr^{3+}). Он выглядел скромно: маленький рубиновый кубик со сторонами в 1 см, две противоположные грани которого имели серебряное покрытие, периодически облучался зеленым светом от лампы-вспышки высокой мощности, которая змеей охватывала рубиновый кубик. Лазерное излучение в виде красных световых импульсов испускалось через небольшое отверстие в одной из посеребренных граней кубика. В том же 1960 году американские физики *А. Джаван*, *В. Беннет* и *Д. Эрриот* создали гелий-неоновый лазер. В 1962 году в СССР и США одновременно появились первые полупроводниковые лазеры.

10.7 ПОЧЕМУ ДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ АТОМНЫХ ЯДЕР МОЖЕТ СЛУЖИТЬ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ?

Атомное ядро состоит из *нуклонов* — протонов и нейтронов. Между протонами действуют силы электростатического отталкивания. Они разорвали бы ядро на части, если бы им не противостояли мощные ядерные силы, прочно связывающие нуклоны в ядре. В отличие от электростатических сил ядерные силы являются короткодействующими; радиус их действия порядка 10^{-15} м.

Обозначим через A полное число нуклонов в ядре; его называют *массовым числом*. Число протонов равно *атомному номеру* Z ; значит, число нейтронов есть $A - Z$. Чтобы разделить данное ядро на составляющие его нуклоны, надо затратить некоторую энергию (ее называют *энергией связи*). Обычно рассматривают *среднюю энергию связи на один нуклон*, определяемую как $E_{\text{св}}/A$, где $E_{\text{св}}$ — энергия, которую надо затратить, чтобы разделить данное ядро на все нуклоны, содержащиеся в ядре. Введем обозначение $E_{\text{св}}/A \equiv \epsilon$.

На рисунке 1 в таблице 21 изображена зависимость ϵ от массового числа A . Из рисунка видно, что вначале величина ϵ быстро растет, достигает максимального значения (около 9 МэВ) примерно при $A = 50$, а затем, при дальнейшем увеличении A , начинает относительно плавно снижаться (до 7,5 МэВ для урана). Общий характер зависимости $\epsilon(A)$ объясняется «противоборством» ядерных сил притяжения и электростатических сил отталкивания. Благодаря своему дальнему действию последние влияют на ход кривой тем сильнее, чем больше A (точнее, чем больше Z); поэтому прочность ядер при больших A постепенно уменьшается.

Зная ϵ для данного ядра, можно вычислить массу ядра M . Обращаем внимание читателя на то, что масса ядра отнюдь не равна сумме масс составляющих это ядро нуклонов; она меньше на некоторую величину ΔM . Умножив ΔM на c^2 (c — скорость света), мы как раз получим полную энергию связи ядра ϵA . Установленная в теории относительности *взаимосвязь массы и энергии* (напомним § 6.5) играет здесь принципиально важную роль. Итак,

$$M = [Zm_{\text{п}} + (A - Z)m_{\text{н}}] - \Delta M = [Zm_{\text{п}} + (A - Z)m_{\text{н}}] - \epsilon A/c^2, \quad (*)$$

где $m_{\text{п}}$ и $m_{\text{н}}$ — соответственно массы протона и нейтрона. Приняв для простоты, что эти массы равны ($m_{\text{п}} = m_{\text{н}} \equiv m$), перепишем (*):

$$M = Am - A\epsilon/c^2. \quad (**)$$

Предположим теперь, что некоторое тяжелое ядро (его характеристики: M , A , ϵ_1) разделилось на два одинаковых ядра (характеристики конечного ядра: M' , $A/2$, ϵ_2); эти ядра выделены на рисунке 1 кружочками. Из рисунка видно, что $\epsilon_2 > \epsilon_1$; в результате деления тяжелого ядра образуются два ядра, каждое из которых более прочно, чем исходное ядро. Используя (**), запишем для исходного ядра:

$$M = Am - A\epsilon_1/c^2$$

и для суммы двух конечных ядер:

$$2M' = Am - A\epsilon_2/c^2.$$

Вычитая второе равенство из первого, находим:

$$M - 2M' = A \cdot (\epsilon_2 - \epsilon_1)/c^2. \quad (***)$$

Поскольку $\epsilon_2 > \epsilon_1$, то следовательно, $M > 2M'$. Итак, деление тяжелого ядра сопровождается «потерей» массы: суммарная масса $2M'$ конечных

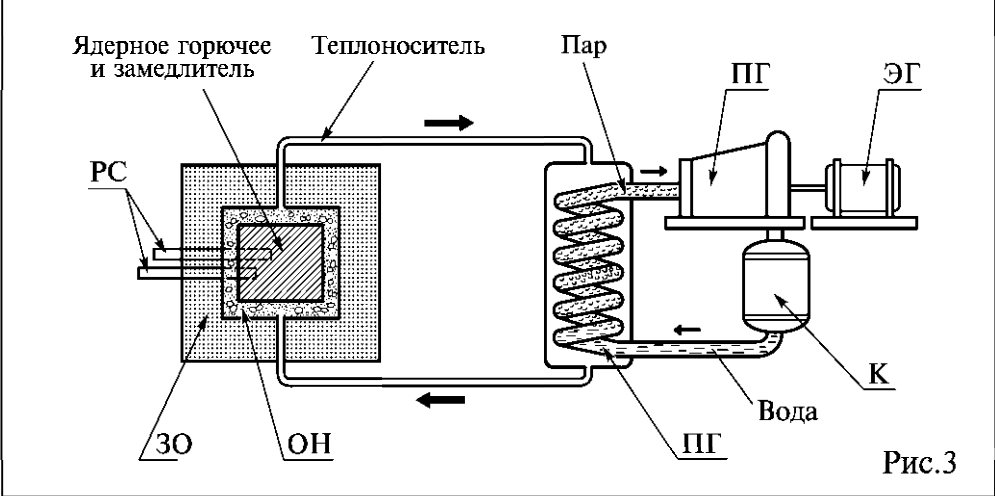
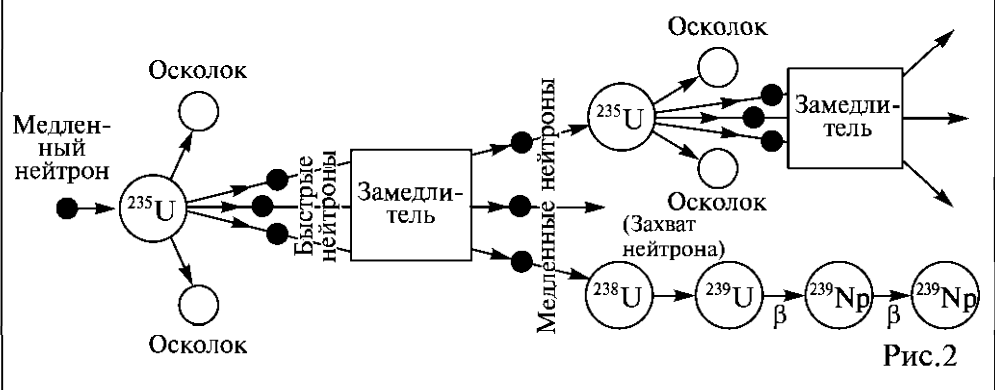
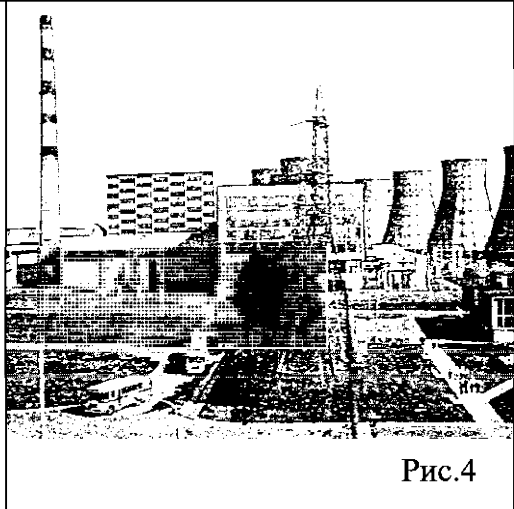
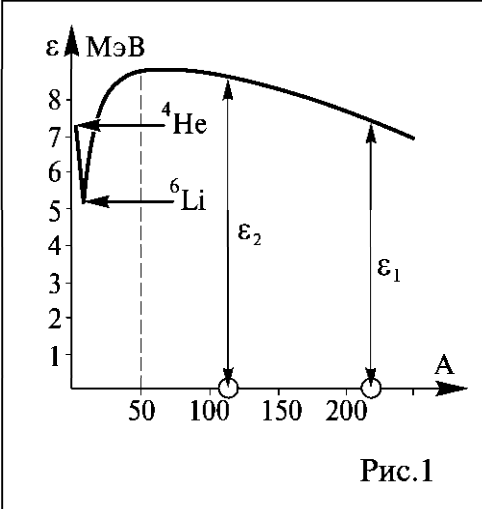
ядер оказывается меньше массы M исходного ядра. В действительности масса не терялась — она превратилась в энергию, равную $(\epsilon_2 - \epsilon_1)A$, как это видно из (***) . Вот почему деление тяжелых ядер может служить источником энергии.

Теперь можно сделать заключение общего характера: всякий процесс, приводящий к перемещению по кривой $\epsilon(A)$ от меньших ϵ к большим (от менее прочных ядер к более прочным), сопровождается *выделением энергии*. Таких процессов может быть два: уже обсуждавшийся процесс *деления тяжелых ядер* (происходит перемещение вверх на нисходящем участке кривой $\epsilon(A)$) и процесс *слияния очень легких ядер*, называемый *термоядерным синтезом* (происходит перемещение вверх на восходящем участке кривой).

10.8 АТОМНЫЙ РЕАКТОР

Ядерным топливом в большинстве существующих атомных реакторов служит ^{235}U (заметим, что в природе этого изотопа урана в 140 раз меньше, чем изотопа ^{238}U). Ядро урана делится на два приблизительно равных по массе ядра-осколков при попадании в него нейтрона. Процесс деления ядер ^{235}U наиболее эффективен (имеет наибольшую вероятность) для достаточно медленных нейтронов, имеющих энергию примерно 0,1 эВ; их называют *тепловыми нейтронами*. Существенно, что при делении ядра урана образуются, кроме ядер-осколков, также два-три новых нейтрона, благодаря чему может возникнуть самоподдерживающаяся *цепная реакция деления*. Она представлена схематически на рисунке 2 в таблице 21. Рождающиеся при делении урана новые нейтроны имеют энергию около 2 МэВ (*быстрые нейтроны*), поэтому для их последующего эффективного участия в цепной реакции необходим *замедлитель*. Сталкиваясь с ядрами замедлителя, быстрые нейтроны теряют энергию, превращаются в тепловые нейтроны и поглощаются новыми ядрами ^{235}U , вызывая их деление. В процессе замедления часть нейтронов «выбывает» из игры — они вылетают из активной зоны реактора или поглощаются замедлителем, теплоносителем, конструкционными материалами и т. п. Для обеспечения непрерывной работы реактора важно, чтобы вероятность нейтронам «выбыть из игры» была согласована с числом рождающихся нейтронов; недаром расчет атомного реактора достаточно трудоемок, требует учета многих факторов. В § 6.7 в книге «Вероятность в современном обществе» мы, рассматривая

Таблица 21. Атомный реактор



метод Монте-Карло, обращались, в частности, к проблеме анализа поведения нейтронов в активной зоне атомного реактора (напомним также § 7.6 в книге «Случайность, необходимость, вероятность»).

Заметим, что важное значение имеет захват нейтронов ядрами ^{235}U . Он порождает цепочку превращений, завершающуюся образованием плутония ^{239}Pu . Эти превращения также показаны на рисунке 2. При попадании теплового нейтрона в ядро ^{239}Pu последнее делится так же, как и ядро ^{235}U . Поэтому с помощью *плутония* также можно осуществить цепную реакцию деления, сопровождаемую выделением значительной энергии.

На рисунке 3 в таблице 21 представлена схема энергетического атомного реактора. Схема содержит *два замкнутых контура*. По одному контуру циркулирует жидкий *теплоноситель* (обычно это вода, но могут использоваться и иные жидкости). Проходя через сердцевину реактора (*активную зону*, в которой находятся *ядерное горючее* и *замедлитель*), теплоноситель забирает энергию, выделившуюся при делении атомных ядер, вследствие чего нагревается. Нагретый теплоноситель проходит затем через *парогенератор ПГ*, где передает часть своей энергии воде во *втором контуре*, превращая ее в пар под высоким давлением. После этого остывший теплоноситель отправляется к активной зоне реактора и опять нагревается. Пар из парогенератора приводит в действие *турбину Т*, связанную с *электрогенератором ЭГ*, после чего конденсируется в *конденсаторе К*, т. е. превращается там в воду, которая возвращается в парогенератор — так функционирует второй контур.

В качестве замедлителя в активной зоне часто используют графит, но может использоваться также тяжелая или обычная вода. В замедлитель вводят *тепловыделяющие элементы* — урановые или плутониевые стержни. Для управления работой реактора предназначены *регулирующие стержни РС* из кадмия или бористой стали, активно поглощающие нейтроны. Выдвигая плавно эти стержни из активной зоны, увеличивают тем самым количество нейтронов в зоне, в результате чего улучшаются условия для самоподдерживающейся цепной реакции. Напротив, вдвигая стержни в активную зону, уменьшают количество нейтронов в зоне (вследствие их поглощения в материале стержней), что может привести к прекращению самоподдерживающейся реакции и остановке реактора.

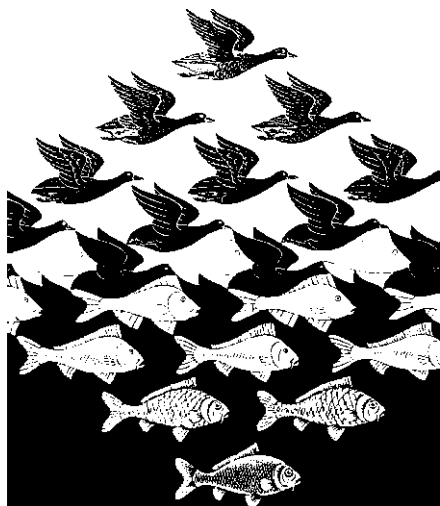
Отметим в заключение, что активная зона окружена *отражателем нейтронов ОН* и толстой *защитной оболочкой ЗО* из бетона с железным наполнителем, задерживающей γ -излучение и нейтроны.

Историческая справка. В январе 1939 года появилась статья немецких физиков *Отто Гана* (1819–1968) и *Фрица Штрассмана* (1902–1980), в которой сообщалось, что в результате облучения урана нейтронами образуются барий, лантан, церий. В

том же году австрийский физик *Лизе Мейтнер* (1818–1968) и английский физик *Отто Фриш* (1904–1979) объяснили суть открытия Гана и Штрассмана — это есть деление ядра урана при попадании в него нейтрона. Цепную реакцию деления урана впервые осуществил в 1942 году *Энрико Ферми*, построивший в США первый в мире атомный реактор (Ферми называл его «ядерным котлом»). В Европе первый атомный реактор был создан в 1946 году в СССР коллективом ученых и инженеров под руководством выдающегося советского ученого *Игоря Васильевича Курчатова* (1903–1960). В 1940 году российские физики *Г.Н. Флеров* и *К.А. Петр-жак* обнаружили спонтанное деление ядер урана. Первая атомная электростанция (АЭС) была построена в 1954 году в Обнинске (СССР); ее мощность составляла 5 МВт. Главным конструктором первой АЭС был видный российский энергетик *Николай Антонович Доллежал* (1899–). К началу 1995 года во всем мире эксплуатировалось 430 энергетических атомных реакторов общей мощностью около 340 ГВт.

На рисунке 4 в таблице 21 показан общий вид Нововоронежской АЭС, построенной в 1980 году. Ее мощность составляет 2500 МВт.

Постскриптум. *Достоинства АЭС:* не потребляют дефицитного органического топлива, нет проблем с транспортировкой топлива, не потребляют атмосферный кислород, не засоряют среду продуктами сгорания, не нарушают экологической обстановки в бассейнах рек. *Отрицательные моменты:* потенциальная опасность радиоактивного загрязнения местности, проблема утилизации радиоактивных отходов и демонтажа АЭС, отслуживших свой срок (около 20 лет). Существует также риск разрушения активной зоны из-за ошибок персонала. В 1986 году мир был потрясен взрывом четвертого реактора Чернобыльской АЭС.



ПОИСКИ ПЕРВОНАЧАЛ МАТЕРИИ: ДОКВАРКОВЫЙ ПЕРИОД

...Было установлено, что при столкновении частиц очень высоких энергий происходит превращение энергии в материю — важнейший, сплошь и рядом встречающийся процесс, вследствие чего уже явно не имеет никакого смысла говорить о делении исходных частиц... На вопрос, из чего они состоят, уже нельзя дать определенного ответа, потому что сам вопрос утратил смысл.

Вернер Гейзенберг

Типы частиц множились. Частицы могли рождаться и уничтожаться. Но сквозь их превращения проступал новый уровень законов сохранения. Новый уровень понятий, на котором сохранилось представление о неизменных формах бытия. О формах, неподвластных рождению или уничтожению. На смену «вечным частицам» в физику пришли «вечные заряды».

Я.Б. Зельдович

(«Драма идей в познании природы»)

11.1 ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА.

ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА

В 1920 году *Эрнест Резерфорд* высказал мысль, что атомное ядро состоит из протонов и электрически нейтральных частиц, которые он назвал «нейтронами», понимая под этим термином *нейтральный дублет* — компактное образование из протона и электрона. Получалось, что, например, α -частица состоит из двух протонов и двух «нейтронов», т. е. содержит в себе четыре протона и два электрона (мы упоминали об этом в § 5.5). Во второй половине 20-х годов прошлого столетия благодаря появлению квантовой механики стало ясно, что электрон принципиально не может находиться внутри ядра (напомним § 8.8). Он не может там находиться ни в «чистом виде», ни, тем более, внутри дублета. Это означало, что наблюдаемые при β -распаде ядер электроны рождаются в процессе β -распада подобно тому, как рождаются фотоны при испускании света атомами. «Изгнание» электрона из атомного ядра, естественно, обострило проблему строения ядра. Возникла мысль, что резерфордовские «нейтроны» — это нейтральные элементарные частицы с массой, близкой к массе протона. Однако пока это было только предположение. Нейтрон еще предстояло открыть.

История открытия нейтрона весьма поучительна. В 1930 году немецкий физик *Вальтер Боте* (1891–1957) совместно с *Г. Беккером* обнаружили, что бериллий при обстреле α -частицами испускает излучение, не оставляющее треков в камере Вильсона. Через свинцовую плиту толщиной 10 см это излучение проходило, почти не ослабевая. Ученые предположили, что оно представляет собой жесткое γ -излучение — электромагнитное излучение, кванты которого (γ -кванты) обладают большой энергией. Загадочным «бериллиевым излучением» заинтересовались французские физики *Ирен Жолио-Кюри* (1897–1956) и *Фредерик Жолио Кюри* (1900–1958). Они обнаружили, что парафиновая заслонка, в отличие от свинцовой, достаточно надежно перекрывала исследуемое излучение; при этом из парафина вылетало по направлению излучения большое число быстрых протонов. Измерив энергию протона, можно было оценить энергию γ -кванта, «выбившего» этот протон из парафина. Супруги Жолио-Кюри определили энергию протонов по максимальным расстояниям, проходимым ими в воздухе, и используя законы сохранения импульса и энергии, нашли, что энергия γ -квантов весьма велика — около $5 \cdot 10$ эВ.

Откуда берется столь большая энергия? Почему, передавая свою энергию протонам, γ -кванты в то же время «не желают» взаимодействовать

с ядрами свинца? Не найдя удовлетворительных ответов на эти вопросы, супруги Жолио-Кюри, тем не менее, опубликовали в январе 1932 года работу, где сделали вывод, что излучение Боте–Беккера есть жесткое электромагнитное излучение.

Познакомившись с этой работой, английский физик *Джеймс Чедвик* (1891–1974) из лаборатории Резерфорда в Кембридже догадался, что немецкие и французские физики имели дело не с жестким электромагнитным излучением, а с нейтронами. Чедвик был учеником Резерфорда; под влиянием учителя он давно проникся идеей нейтрона, искал нейтроны, был уверен в их существовании. Впоследствии он признался: «Мои мысли, естественно, вертелись вокруг нейтронов». Чедвик повторил опыты супругов Жолио-Кюри, внося в них существенное дополнение с целью проверки нейтронной гипотезы: он применил разные заслонки, содержащие легкие элементы (водород, литий, углерод, азот и др.). Оказалось, что излучение, возникающее при обстреле бериллия α -частицами, порождает не только протоны, но и другие ядра — ядра лития, углерода, азота. Для измерения энергии ядер отдачи Чедвик воспользовался импульсной ионизационной камерой с усилителем и осциллографом. Ионизационная камера имеет два электрода, между которыми имеется разность потенциалов 10^2 – 10^3 В. Выбитое из заслонки ядро, пролетая между электродами, производит ионизацию атомов газа, наполняющего камеру. Образующиеся ионы и электроны движутся к соответствующим электродам, и в цепи камеры возникает импульс тока, который может быть усилен и подан на осциллограф. Схема экспериментальной установки Чедвика показана на рисунке 1 в таблице 22 (*БК* — вакуумная камера, *ИК* — ионизационная камера).

Измеряя наблюдаемый на осциллографе импульс, Чедвик определял энергию различных ядер, выбитых из заслонки. Сравнив затем эти энергии, он пришел к выводу: излучение Боте–Беккера есть не что иное, как *поток нейтральных частиц с массой, весьма близкой к массе протона*. И вот 27 февраля 1932 года появляется сообщение Чедвика, где, в частности, говорилось:

«Результаты, полученные мною, очень трудно объяснить, исходя из предположения об электромагнитном излучении, если при столкновении должны сохраняться энергия и количество движения. Однако трудности исчезают, если предположить, что излучение состоит из частиц с массой протона и нулевым зарядом, т. е. из нейтронов. Можно предположить, что в результате захвата α -частицы ядром бериллия образуется ядро углерода и испускается нейтрон».

Конечно, исследования Боте, Беккера и супругов Жолио-Кюри сыграли важную роль в открытии нейтрона. Однако решающего шага эти

физики все-таки не сделали. Как образно выразился Б.М. Кедров, «они подошли вплотную к двери, ведущей к разгадке новой тайны природы, они ошупали эту дверь и даже постучались в нее, но открыть ее не смогли, так как эта дверь открывается не «к себе» (то есть в сторону электромагнитной концепции), а «от себя» (то есть в сторону коренного отказа от этой концепции)». Решающий шаг сделал Чедвик. Выполнив измерения энергии ядер отдачи для разных заслонок и сопоставив полученные количественные результаты, Чедвик сделал правильный вывод о существовании нейтрона.

Итак, при попадании α -частицы в ядро бериллия происходит следующая ядерная реакция:



где через n обозначен нейтрон. Его электрический заряд равен нулю, а масса покоя равна $1838,5m$, где m — масса электрона. Нейтрон чуть-чуть тяжелее протона — всего на $2,5m$ (на 0,14%). Спин нейтрона равен $1/2$; нейтрон относится к фермионам.

Сразу после появления сообщения Чедвика несколько ученых — *Вернер Гейзенберг*, российский физик *Дмитрий Дмитриевич Иваненко* (1904–1994) и итальянский физик *Этторе Майорана* (1906–1938) — почти одновременно предложили *протонно-нейтронную модель* строения атомного ядра. Согласно этой модели атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Число протонов Z в ядре равно *порядковому номеру* соответствующего химического элемента в Периодической системе элементов. Суммарное число протонов и нейтронов A есть массовое число. Количество нейтронов в ядре равно $A - Z$. Один и тот же элемент может иметь несколько *изотопов*, ядра которых различаются по числу нейтронов. Поэтому для задания ядра недостаточно указать химический элемент; надо кроме того указывать массовое число (его указывают сверху слева от символа элемента). В § 10.8 мы рассматривали два изотопа урана: ${}^{235}\text{U}$ и ${}^{238}\text{U}$. Порядковый номер урана 92; значит, число протонов в ядрах обоих изотопов равно 92. Количество нейтронов в ядре изотопа ${}^{235}\text{U}$ равно $235 - 92 = 143$, а в ядре изотопа ${}^{238}\text{U}$ равно $238 - 92 = 146$.

На рисунке 2 в таблице 22 изображена условная схема строения ядра лития такой, какой она мыслилась до открытия нейтрона (рис. 2а), и такой, какой ее следует представлять в соответствии с протонно-нейтронной моделью (рис. 2б).

В электромагнитной картине мира есть только два фундаментальных взаимодействия — *электромагнитное* и *гравитационное*, а вся материя «построена» из трех элементарных частиц — *электрона, протона, фото-*

на (напомним § 5.5). С открытием нейтрона стало ясно, что двух фундаментальных взаимодействий недостаточно. Возник вопрос: Благодаря каким силам протоны и нейтроны столь прочно удерживаются в стабильных ядрах? Какие силы противостоят электростатическому отталкиванию протонов? Так в физике появились *ядерные* силы, а значит, еще одно фундаментальное взаимодействие. Его назвали *сильным взаимодействием*. Однако и этого оказалось недостаточно. Выяснилось, что новая частица *нестабильна* — она самопроизвольно превращается в протон и электрон. В результате в физике появилось четвертое фундаментальное взаимодействие. Его назвали *слабым взаимодействием*.

11.2 НЕСТАБИЛЬНОСТЬ НЕЙТРОНА И ПРЕДСКАЗАНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ НЕЙТРИНО

Откуда берется электрон, рождающийся при β -распаде ядра? Массовое число при этом не меняется, а порядковый номер Z увеличивается на единицу. Значит, число нейтронов в ядре уменьшается на единицу. Иначе говоря, нейтрон внутри β -радиоактивного ядра способен самопроизвольно распадаться на протон и электрон. *Электрон вылетает, а протон остается внутри ядра*. Нестабильность нейтрона обнаруживается не только в β -радиоактивных ядрах, но, естественно, и тогда, когда нейтрон свободен. Более того, если даже в β -радиоактивном ядре далеко не каждый нейтрон подвергается распаду, то любой свободный нейтрон обязательно нестабилен.

Из сказанного следует, что реакция распада нейтрона имеет вид:



где p — протон, e^- — электрон. *Время жизни* нейтрона, который распадается внутри β -радиоактивного ядра, зависит от выбора химического элемента и может варьироваться в широком диапазоне. Время жизни свободного нейтрона вполне определенное — оно равно примерно 900 с.

Напомним, что понятие «время жизни» имеет вероятностный смысл (см. § 5.6). Вероятность нейтрону «прожить» до своего распада время t не зависит от того, сколько он уже «прожил», и равна

$$P(t) = e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

где величина τ как раз и есть время жизни. В отношении нестабильных микрообъектов (в том числе нейтрона) часто пользуются хорошо пред-

ставимым понятием «*период полураспада*». Это есть промежуток времени, в течение которого количество микрообъектов уменьшается вдвое вследствие распада (разумеется, речь идет не о нескольких микрообъектах, а о больших коллективах). Обозначим период полураспада через $T_{1/2}$. Если в момент $t = 0$ число микрообъектов равно $N(0)$, то к моменту $t = T_{1/2}$ их останется $N(T_{1/2}) = N(0) \cdot P(T_{1/2}) = N(0)e^{-T_{1/2}/\tau}$. Подставляя сюда $N(T_{1/2}) = N(0)/2$, находим: $e^{-T_{1/2}/\tau} = 1/2$. Отсюда следует, что

$$T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2 = 0,693\tau. \quad (4)$$

Вернемся к проблеме нестабильности нейтрона. По сути дела, она возникла еще до открытия нейтрона в виде проблемы β -распада ядер. Исследуя β -распад ядер, ученые обнаружили, что энергия электрона, рождающегося при β -распаде, *оказывается разной в разных актах распада и всегда меньше разности энергий исходного и конечного ядер*. Создавалось впечатление, что при β -распаде нарушается закон сохранения энергии. Решение проблемы нашел Вольфганг Паули. В декабре 1930 года он прислал участникам семинара в Тюбингене письмо, в котором предположил, что при β -распаде ядра рождается, наряду с электроном, некая исключительно легкая и трудно наблюдаемая нейтральная частица, *которая и уносит недостающую энергию*. Именно поэтому энергия, выделяемая при β -распаде ядра, не переходит к электрону полностью.

Надо было иметь немалую научную смелость, чтобы предлагать новую частицу в те годы, когда все были уверены, что мир построен из трех типов частиц. «Я сделал сегодня нечто ужасное, — писал Паули в том письме. — Физику-теоретику не следует делать ничего такого. Я предложил нечто, что никогда нельзя будет проверить экспериментально».

Энрико Ферми, занимавшийся в то время исследованием β -распада, предложил назвать гипотетическую частицу *нейтрино* (в переводе с итальянского это означает «нейтрончик»). Так буквально на кончике пера появилась в физике новая элементарная частица — нейтрино. С учетом гипотезы Ферми реакцию распада нейтрона надо записывать не в виде (2), а в следующем виде:

$$n \rightarrow p + e^- + \nu, \quad (5)$$

где ν — нейтрино.

В 1934 году Ферми разработал *теорию β -распада*. Он воспользовался при этом не только гипотезой Паули, но также идеей Поля Дирака о существовании античастиц, экспериментально подтвержденной в 1932 году открытием в космическом излучении антиэлектрона (позитрона) e^+ . Мы поговорим об идее Дирака позднее, в § 11.4, а пока отметим лишь, что

теория Ферми не только объяснила все основные черты β -распада, но и дала возможность ввести, наряду с нейтрино ν , также антинейтрино $\bar{\nu}$. Согласно этой теории, нейтрон превращается по схеме:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}. \quad (*)$$

В то же время возможна следующая схема превращения для связанного в ядре протона:

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu. \quad (**)$$

Обратим внимание читателя: при превращении нейтрона рождаются электрон и антинейтрино, а при превращении протона рождаются антиэлектрон (позитрон) и нейтрино. Обратим внимание также на то, что мы без лишнего шума заменили глагол «распадается» на более подходящий в данном случае глагол «превращается».

Со временем ученые пришли к заключению, что существуют три типа нейтрино (и соответственно, антинейтрино). Они назвали их *электронным нейтрино* (ν_e), *мюонным нейтрино* (ν_μ) и *таонным нейтрино* (ν_τ). В процессах с участием электрона (позитрона) наблюдаются электронные нейтрино (антинейтрино). Так что реакции (*) и (**) выглядят в современной записи так:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e; \quad (6)$$

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e. \quad (7)$$

Вскоре после открытия нейтрона физики получили убедительное (хотя и косвенное) доказательство существования нейтрино. Будем рассматривать акт превращения нейтрона в системе отсчета, связанной с нейтроном. Для достаточно медленных нейтронов эта система отсчета практически совпадает с лабораторной системой. Если бы при превращении нейтрона не рождалось антинейтрино, то в этом случае, согласно закону сохранения импульса, протон и электрон должны были бы двигаться строго в противоположные стороны. Опыт, однако, показал, что направления движения протона и электрона составляют между собой некоторый тупой угол. Значит, сумма векторов их импульсов не может оказаться нулевой и нужен третий импульс (и следовательно, третья частица), чтобы образовался треугольник векторов-импульсов.

Нейтрино всех трех типов электронейтральны, имеют спин $1/2$ (они фермионы). Полагают, что подобно фотонам нейтрино *не имеют массы покоя* и, значит, движутся со скоростью света. Впрочем, поиски массы покоя у нейтрино продолжаются. По современным оценкам, масса по-

коя электронного нейтрино, если она и есть, то, во всяком случае, не превышает шести стотысячных массы электрона.

Высказанное Вольфгангом Паули в 1930 году сомнение, что вряд ли удастся когда-либо наблюдать нейтрино, имело основание. Нейтрино крайне слабо взаимодействуют с веществом. Недаром за ними закрепился эпитет «неуловимые». Так, например, нейтрино практически свободно пронизывают всю толщу Солнца.

И тем не менее ученым удалось наблюдать нейтрино вопреки предсказанию Паули. Первое прямое подтверждение существования электронного нейтрино они получили четверть века спустя после упомянутого предсказания. Это сделали в 1956 году американские физики *Клайд Лоррен Коуэн* (род. 1919 г.) и *Фредерик Райнес* (род. 1918 г.).

11.3 ПРЯМОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ НЕЙТРИНО

Речь идет в данном случае об электронном нейтрино. Строго говоря, Коуэн и Райнес наблюдали электронное антинейтрино. Ясно, что тем самым было получено прямое подтверждение существования также и электронного нейтрино.

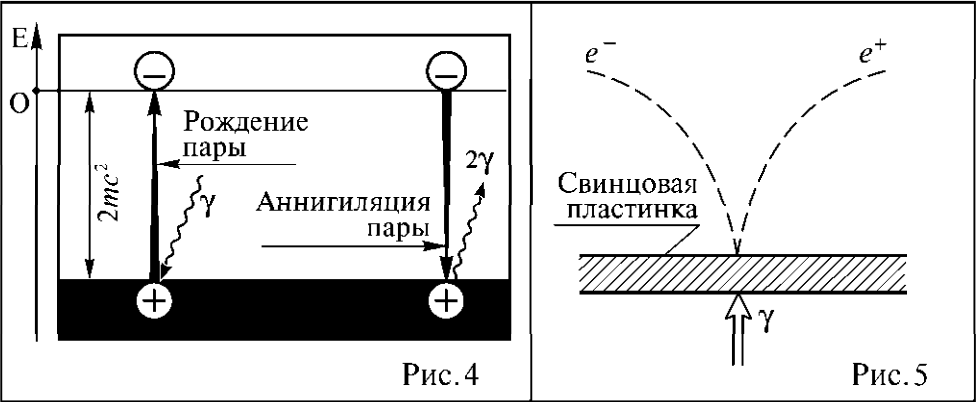
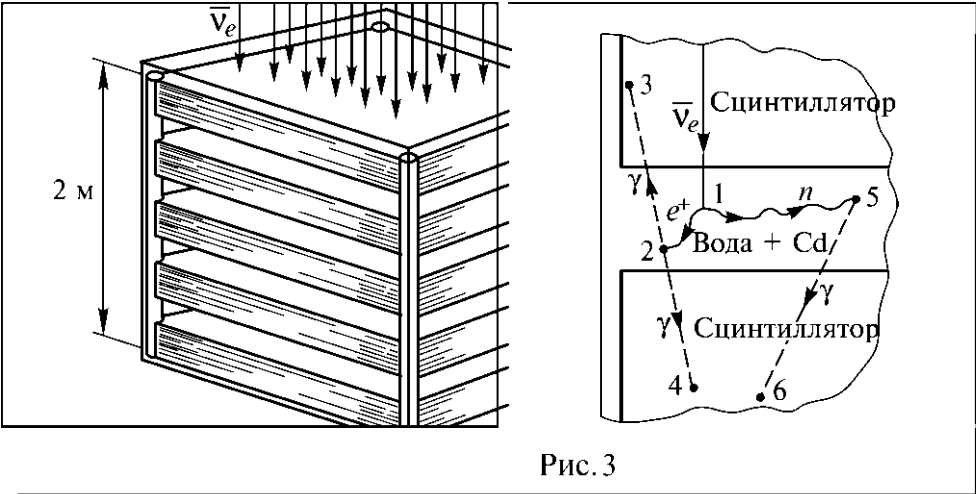
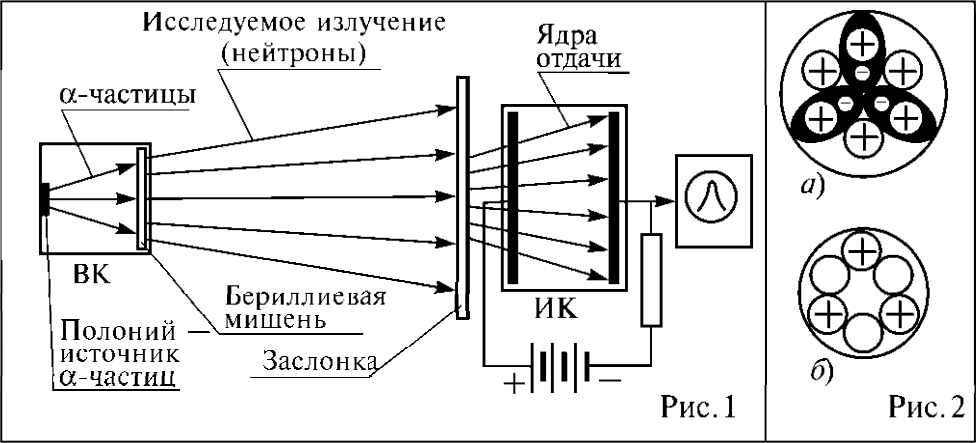
Неуловимые частицы были обнаружены в потоке антинейтрино, летящих из атомного реактора. Ядра-осколки, образующиеся при делении ядер урана, оказываются β -радиоактивными; они испускают электронные антинейтрино со средней энергией 4 МэВ. На одно деление ядра урана приходится в среднем 6 антинейтрино. В эксперименте Коуэна и Райнеса поток антинейтрино из мощного реактора составлял 10^{13} частиц на 1 см^2 в 1 с. Для регистрации антинейтрино использовался процесс:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+. \quad (8)$$

В поток антинейтрино был помещен специальный детектор, состоящий из нескольких слоев воды (с добавкой солей кадмия), разделенных сцинтилляторами, способными регистрировать отдельные фотоны посредством световых вспышек (сцинтилляций). Схема эксперимента представлена на рисунке 3 в таблице 22.

Существует очень маленькая вероятность того, что какое-то антинейтрино провзаимодействует с протоном в слое воды и вызовет процесс (8), в результате которого рождаются нейтрон и позитрон. Надо было зарегистрировать этот крайне редкий случай, если он действительно произойдет. Для этого и использовались сцинтилляторы. Родившийся в точке 1 (см. рисунок) позитрон быстро, за время порядка 10^{-9} с, тормо-

Таблица 22. Открытие нейтрона. Открытие позитрона



зится и испытывает в точке 2 аннигиляцию с одним из электронов атома воды; в точке 2 происходит процесс: $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$, где γ — фотон. Родившиеся в этом процессе два фотона разлетаются в противоположные стороны и могут быть одновременно зарегистрированы в двух соседних сцинтилляторах (в точках 3 и 4 на рисунке). Что же касается родившегося в точке 1 нейтрона, то он относительно долго, около 10^{-5} с, «путешествует» в слое воды, пока его не захватит одно из ядер кадмия (захват произошел в точке 5 на рисунке). Поглотив нейтрон, ядро кадмия испускает фотон (один или несколько), который регистрируется в одном из сцинтилляторов (в точке 6 на рисунке).

Таким образом, на столкновение антинейтрино с протоном сцинтилляторы должны отреагировать тремя импульсами: сначала парой одновременных импульсов, наблюдаемых в соседних сцинтилляторах, а затем, спустя примерно 10 с, еще одним импульсом. Каждый из первых двух импульсов соответствует энергии фотона около 0,5 МэВ, тогда как третий импульс — энергии порядка 10 МэВ. В эксперименте Коуэна и Райнеса действительно наблюдалась такая специфическая картина импульсов (примерно два–три раза в час). Тем самым было экспериментально подтверждено существование электронного антинейтрино (а вместе с тем и электронного нейтрино).

Надо заметить, что в то время, когда ставился описанный эксперимент, ученые еще не знали, что существуют три разных нейтрино (антинейтрино). Поэтому, естественно, никто не думал, что в эксперименте Коуэна и Райнеса обнаружен только один из типов нейтрино — тот, который впоследствии будет называться *электронным нейтрино*.

Существование *мюонного нейтрино* было экспериментально доказано в 1962 году американскими физиками *Леоном Ледерманом* (род. 1922 г.), *Мельвином Шварцем* (род. 1932 г.), *Джеком Стейнбергером* (род. 1921 г.).

Существование *таонного нейтрино* стало вполне очевидным после того, как американский физик *Мартин Льюис Перл* (род. 1927 г.) открыл в 1975 году τ -лептон.

11.4 В ПРЕДВИДЕНИИ АНТИМИРА. ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА

Возвратимся мысленно к концу 20-х годов прошлого столетия. В 1928 году *Поль Дирак*, стремясь объединить теорию квантов и специальную теорию относительности, получил уравнение, известное ныне как *уравнение Дирака*. Из этого уравнения не только следовало наличие у электрона спина, но и получалось, что у электрона должен быть поло-

жительно заряженный «двойник». Так в физике появился *позитрон* (пока еще чисто теоретически).

Согласно теории Дирака, возможные энергетические состояния свободного электрона разбиваются на две группы: состояния с энергией $E > 0$ (область положительных энергий) и состояния с энергией $E < -2mc^2$ (m — масса покоя электрона, c — скорость света), т. е. состояния с отрицательной энергией. Между областями положительных энергий и отрицательных энергий существует «энергетическая щель» шириной $2mc^2$. Все состояния в области отрицательных энергий *предполагаются заполненными электронами и образуют физически ненаблюдаемый фон*. Если в этом бесконечном «море» электронов с отрицательными энергиями какие-то состояния окажутся незанятыми, то такие незаполненные состояния («дырки») должны наблюдаться на опыте, *воспринимаясь как положительно заряженные частицы с массой электрона* (как позитроны, или, иными словами, как антиэлектроны).

«Дырка» в дираковском «море» электронов с отрицательными энергиями возникает тогда (и это означает рождение наблюдаемого экспериментатором антиэлектрона), когда один из электронов «моря» поглощает фотон с энергией не менее $2mc^2$ и совершает *квантовый переход* через «энергетическую щель» в область положительных энергий. В результате одновременно с рождением антиэлектрона (позитрона) экспериментатор должен регистрировать также появление электрона. *Фотон уничтожился — родилась электронно-позитронная пара*. Схематически этот процесс изображен на рисунке 4 в таблице 22.

Там же изображен обратный процесс — когда электрон скачком через «энергетическую щель» возвращается в «дырку», в результате чего уничтожаются обе наблюдавшиеся экспериментатором частицы (электрон и позитрон). При этом рождается фотон. Точнее говоря, рождаются два фотона, разлетающиеся в противоположные стороны (этого требует закон сохранения импульса). Данный процесс называют *аннигиляцией электронно-позитронной пары*.

Процессы рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар можно записать симметричным образом:

$$\text{Рождение пары: } \gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+; \quad (9)$$

$$\text{Аннигиляция пары: } e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma \quad (10)$$

(реакция (10) уже приводилась в § 11.3). Впрочем, вероятность столкновения двух фотонов весьма мала; поэтому на практике имеют дело с реакцией:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+, \quad (11)$$

которая из-за необходимости выполнения закона сохранения импульса происходит лишь при наличии внешнего поля (фотон пролетает в кулоновском поле атомного ядра или иона). Отметим, что вероятность процесса (10) близка к единице: «дырки» быстро заполняются электронами из области положительных энергий.

Обратим внимание читателя на то, что процессы рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар похожи на процессы рождения и рекомбинации электроинно-дырочных пар, происходящие в полупроводниках (сопоставьте рисунок 4 в таблице 22 с рисунком 3 в таблице 18).

Еще важнее обратить внимание читателя на то, что *процессы рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар разрушают считавшуюся дотоле непреодолимой границу между веществом и полем*. Оказывается, *поле может превращаться в вещество* (явление рождения пар) и, наоборот, *вещество может превращаться в поле* (явление аннигиляции пар).

В 1931 году Поль Дирак прямо указал на реальную возможность наблюдать явление рождения электронно-позитронных пар. Он сделал удивительное предсказание: должны существовать не только антиэлектроны, но также антипротоны. Фактически это было предвидение *существования антимира*. Вот что писал Дирак в 1931 году:

«Дырка», если бы она существовала, была бы частицей нового сорта, неизвестной в экспериментальной физике. Поскольку у этой частицы была бы масса электрона, а заряд положительного знака, мы можем назвать ее антиэлектроном. Так как антиэлектроны быстро аннигилируют с электронами, не следует ожидать, что любую такую частицу легко обнаружить. Но если эти частицы создавать экспериментально в высоком вакууме, они будут достаточно стабильны, и их можно будет наблюдать. По высказанной точке зрения, протоны никак не связаны с электронами. Можно предположить, что протоны имеют свои собственные состояния с отрицательной энергией, которые обычно все заполнены. Незаполненное состояние с отрицательной энергией будет эквивалентно антипротону».

В 1932 году предсказание Дирака в отношении электронного «двойника» блестяще подтвердилось. Американский физик *Карл Дейвид Андерсон* (1905–1991), исследуя космическое излучение, обнаружил в камере Вильсона, помещенной в мощное магнитное поле, следы частицы, которая отклонялась подобно электрону, но в другую сторону. Так состоялось открытие *позитрона*.

В 1933 году супруги Жолио-Кюри зарегистрировали рождение электронно-позитронной пары. Они направили пучок γ -квантов от радиоактивного источника на свинцовую пластинку и наблюдали в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, характерный след в виде двурогой

вилки. Этот след изображен на рисунке 5 в таблице 22. Линии магнитной индукции направлены в данном случае перпендикулярно к плоскости рисунка навстречу читателю. Позитрон отклоняется в направлении по часовой стрелке, а электрон — в направлении против часовой стрелки (под действием силы Лоренца, с которой мы познакомились в § 4.7; см. соотношение (7)).

Сбылось также предсказание Дирака относительно существования *антипротона*. Антипротон был открыт в 1955 году на первом большом ускорителе заряженных частиц в Беркли (США). Его зарегистрировали американские физики *Эмилио Джини Сегре* (1905–1989) и *Оуэн Чемберлен* (род. 1920 г.).

Как уже отмечалось в предыдущих параграфах, существуют античастицы и у нейтрино. Они есть также у нейтрона и практически у всех элементарных частиц. Одним из редких исключений является фотон; у него нет античастицы. Правильнее говорить о тождественности фотона и антифотона.

11.5 ОТ ТЕОРИИ ДИРАКА К КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Квантовая теория поля является основным аппаратом физики элементарных частиц, их взаимодействий и взаимопревращений. Включает в себя теорию электромагнитного взаимодействия (квантовую электродинамику) и слабого взаимодействия, выступающих в современной теории как единое целое (электрослабое взаимодействие), а также теорию сильного (ядерного) взаимодействия (квантовую хромодинамику).

*Из Большого энциклопедического словаря,
Москва—С.Петербург, 1997*

Читатель. Весьма удивительно безграничное дираковское «море» электронов с отрицательными энергиями, которое проявляет себя не благодаря присутствию электронов, а благодаря их отсутствию. На мой взгляд, это — какая-то надуманная концепция, оторванная от реальности. Позитрон, появляющийся в этой концепции как «дырка» в «море» электронов, мало похож на реальную частицу.

Автор. Надо учитывать, что теория Дирака обосновала наличие спина у электрона, предсказала существование позитрона, правильно описала

его свойства. На основе данной теории можно было рассматривать как квантовые переходы электрона в атоме, так и процессы взаимодействия электронов и позитронов. Тем не менее Ваши критические замечания вполне основательны. Заметим, что концепция Дирака исходила из предположения, никогда не подвергавшегося сомнению: считалось само собой разумеющимся, что *электрон является частицей вечной и неуничтожимой*. Чтобы согласовать свою теорию с установленными к тому времени фактами, Дираку пришлось *приписать* вечному и неуничтожимому электрону удивительную способность находиться не только в состояниях с положительной энергией, но и в состояниях с отрицательной энергией, отделенных от первых «энергетической щелью» шириной $2mc^2$. Испустив два (или более) фотона, электрон может перескочить в состояние с отрицательной энергией (если, конечно, оно не занято) и спрятаться от наблюдателя в электронном «море». Поглотив фотон, электрон может «выскочить из моря» и снова стать наблюдаемым. На смену этой концепции, отвечающей *старым стереотипам*, пришла *принципиально новая концепция*, на основе которой родилась *квантовая теория поля*.

Читателя. В чем же сущность этой новой концепции и что представляет собой квантовая теория поля?

Автор. Согласно новой концепции, «ныряние» электрона в таинственное дираковское «море» и «выскакивание» электрона оттуда, равно как и само «море», становятся попросту ненужными, *если мы откажемся от идеи вечности и неуничтожимости электрона и будем исходить из принципиально нового представления, что электроны могут рождаться и уничтожаться* (в паре с позитронами). Именно на этом и основывается квантовая теория поля. У ее истоков стояли *Поль Дирак, Владимир Александрович Фок, американский физик Юджин Вигнер (1902–1995)*. Они развили *метод вторичного квантования* — метод описания систем из большого числа рождающихся и уничтожающихся частиц, в котором роль аргументов волновой функции играют *числа заполнения* (числа частиц в том или ином состоянии). В математический аппарат вводятся *оператор рождения и оператор уничтожения* частицы; первый увеличивает, а второй уменьшает на единицу число частиц в данном состоянии.

Читателя. Как я понимаю, с переходом от дираковской теории электрона к квантовой теории поля связаны весьма существенные изменения в представлениях о процессах, происходящих на уровне микроявлений. Не так ли?

Автор. Именно так. На «языке» теории Дирака электрон перешел из ненаблюдаемого «моря» в состояние, в котором его можно зарегистрировать. На «языке» квантовой теории поля произошло рождение элект-

рона (и одновременно рождение позитрона). На «языке» теории Дирака электрон перешел в состояние, в котором его нельзя наблюдать. На «языке» квантовой теории поля произошло уничтожение электрона (и одновременно уничтожение позитрона). Заметьте, что в квантовой теории поля электрон и позитрон рассматриваются как *равноправные* реальные частицы, тогда как в теории Дирака реальной частицей был лишь электрон, а позитрон возникал как эффект отсутствия электрона. Фактически теория Дирака — это финал в развитии собственно *квантовой механики*, поскольку последняя позволяет описывать движение того или иного микрообъекта без учета его рождения или уничтожения. Дальнейшее развитие теории квантов шло под флагом *квантовой теории поля*, принципиально учитывающей рождение и уничтожение микрочастиц. Конечно, квантовая теория не отменила квантовой механики; она явилась *обобщением* последней.

Читатель. Может быть, не следует придавать словам «рождение» и «уничтожение» буквального смысла? Фотон *превращается* в электронно-позитронную пару, а электронно-позитронная пара *превращается* в фотоны. Мы имеем дело не с рождениями и уничтожениями как таковыми, а с *превращениями*. Не правда ли?

Автор. Правда. Однако, это не вся правда. Электронно-позитронная пара может родиться также и в отсутствие фотона; она может родиться из *вакуума*. И она может самоуничтожиться, не породив фотона.

Читатель. О вакууме заходил, как я вспоминаю, разговор в нашей беседе в § 5.6. Там отмечалось, что современная физика рассматривает вакуум не как пустоту, а как пространство, «заполненное» случайным образом рождающимися и уничтожающимися элементарными частицами.

Автор. Да, именно так представляют вакуум в квантовой теории поля. В теории Дирака, заметим, вакуум — тоже отнюдь не пустое пространство. Там вакуум — это безграничное «море» электронов с отрицательной энергией, в котором заполнены *все состояния* (нет ни одной «дырки»). В отличие от теории Дирака, вакуум в квантовой теории поля заполнен спонтанно рождающимися и уничтожающимися виртуальными фотонами, виртуальными электронами, виртуальными позитронами, виртуальными протонами и прочими *виртуальными элементарными частицами*.

Читатель. Слово «виртуальный» объясняется в Словаре иностранных слов как «возможный, такой, который может проявляться при определенных условиях». Получается, что «виртуальный» — это как бы не существующий в действительности, всего лишь возможный, воображаемый. Как следует представлять себе виртуальные частицы? Можно ли

говорить о том, что они действительно существуют? Не являются ли они всего лишь плодом воображения физиков-теоретиков?

Автор. Нет, не являются. Мы поговорим подробнее об этом позднее, в § 13.6. А пока я замечу лишь, что сами по себе виртуальные частицы *принципиально ненаблюдаемы*; их следует рассматривать как частицы, находящиеся в *промежуточных* состояниях, как частицы, существующие достаточно короткое время Δt , связанное с их энергией E известным соотношением неопределенностей Гейзенберга $\Delta t \approx \frac{\hbar}{2\pi E}$. Следует подчеркнуть, что *виртуальные частицы — одно из центральных понятий в квантовой теории поля*. Взаимодействие каких-либо двух реально существующих (наблюдаемых) частиц рассматривается, согласно квантовой теории поля, как процесс, в котором одна из реальных частиц рождает виртуальную частицу определенного типа, поглощаемую другой реальной частицей. *Виртуальные частицы выступают как переносчики взаимодействия в квантовой теории поля* и, следовательно, не могут рассматриваться как нечто, придуманное физиками-теоретиками для построения согласующейся с опытом теории. Если бы виртуальные частицы в самом деле были не более как изобретением ученых, то пришлось бы принять, что частицы взаимодействуют на расстоянии *без посредников*, т. е. пришлось бы вернуться к *теории дальнего действия*, уже давно отвергнутой наукой.

Читатель. Но теория близкого действия исходит из идеи, что переносчиком взаимодействия между телами (и значит, между отдельными частицами) является физическое поле.

Автор. Так оно и есть. Только теперь речь идет не о классическом поле-континууме, а о *квантованном* физическом поле, т. е. поле, которое представляется как совокупность *дискретных квантов*, соответствующих всевозможным состояниям поля. Недаром данная теория называется «*квантовая теория поля*». В рамках электромагнитной картины мира (см. § 6.5) рассматривались два фундаментальных физических поля — электромагнитное и гравитационное (и два соответствующих фундаментальных взаимодействия). В квантовой теории поля рассматриваются четыре физических поля, ответственных за четыре фундаментальных взаимодействия — *гравитационное, слабое, электромагнитное, сильное* (об этих взаимодействиях мы поговорим в § 11.7). У каждого из полей есть свои кванты. Они являются *переносчиками соответствующих взаимодействий*. На сегодняшний день наиболее изучено электромагнитное взаимодействие. Его переносчиками являются уже хорошо знакомые нам фотоны. Фотоны могут наблюдаться как *реальные* частицы. Переносчиками электромагнитного взаимодействия являются вир-

туальные фотоны. *Электромагнитное взаимодействие — это обмен виртуальными фотонами.*

В § 11.8 мы познакомимся с элементарными частицами, называемыми *π-мезонами (пионами)*. Заряженные *π-мезоны* были экспериментально открыты в 1947 году, а нейтральные — в 1950 году. Виртуальные *π-мезоны* могут рассматриваться как переносчики сильного взаимодействия, связывающего нуклоны в ядре. Протоны и нейтроны прочно удерживаются внутри стабильных ядер *благодаря обмену виртуальными π-мезонами.*

Читателя. Все это весьма интересно. Где бы можно было подробнее прочитать об элементарных частицах и, в частности, о вакууме и виртуальных частицах?

Автор. Наше знакомство с элементарными частицами в рамках данной книги еще далеко не закончено. Тем не менее хотелось бы порекомендовать познакомиться с книгой: *Л.Б. Окунь. α, β, γ...Z: Элементарное введение в физику элементарных частиц.* М.: Наука. 1985 (Библиотечка «Квант», выпуск 45).

11.6 ДИАГРАММЫ ФЕЙНМАНА

Квантовую теорию поля, изучающую процессы, *обусловленные электромагнитным взаимодействием* (иначе говоря, квантовую теорию взаимодействующих электромагнитных полей и заряженных частиц), называют *квантовой электродинамикой*. Решающую роль в развитии этой теории сыграли американские физики *Ричард Филлипс Фейнман* (1918–1988) и *Джулиас Швингер* (1918–1994), а также японский физик *Синъитиро Томонага* (1906–1979).

Для вычисления вероятностей различных процессов взаимодействия фотонов, электронов, позитронов Фейнман ввел в 1949 году *наглядное графическое представление* этих процессов в виде диаграмм, известных ныне как *диаграммы Фейнмана*.

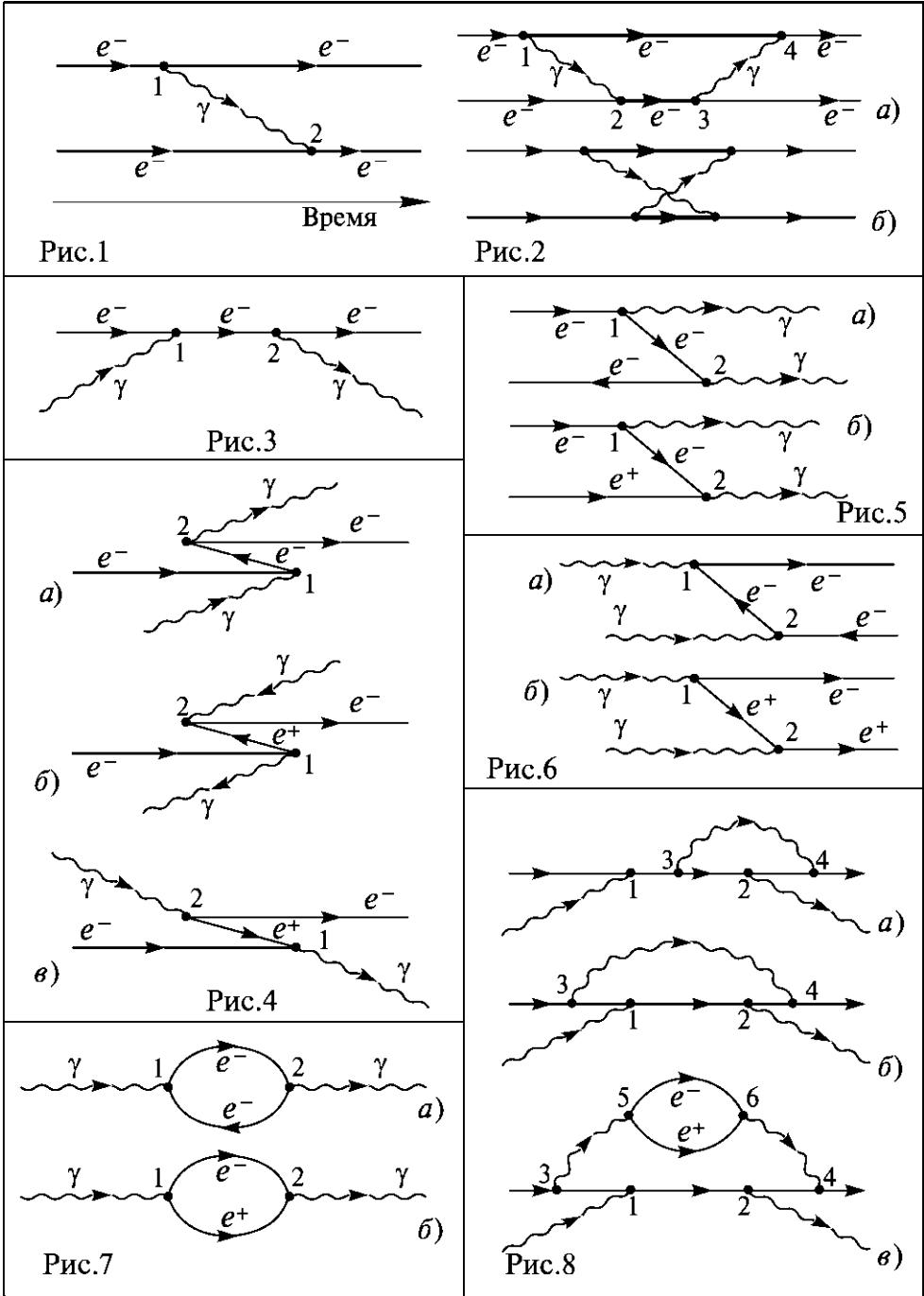
На рисунке 1 в таблице 23 показана диаграмма Фейнмана, представляющая процесс *рассеяния электрона на электроне*. Линии со стрелками на диаграмме условно изображают движения частиц (прямые линии — это электроны, волнистая линия — фотон). В точках 1 и 2 (их называют *вершинами* диаграммы) происходят акты взаимодействия частиц. На диаграммах Фейнмана линии, которые начинаются в одной вершине и заканчиваются в другой вершине, соответствуют *виртуальным* частицам. Линии, которые только начинаются или только заканчиваются в

какой-либо вершине, соответствуют *реальным* частицам (эти частицы можно наблюдать в эксперименте). В случае, изображенном на рисунке 1, фотон — виртуальная частица, а все четыре электрона — реальные частицы (два исходных электрона и два конечных электрона). На диаграммах Фейнмана, принято считать, что ось времени направлена *горизонтально слева направо*. Поскольку направление времени известно, стрелки на линиях часто не ставят (но мы их все-таки будем ставить для большей ясности). Теперь мы можем «прочитать» диаграмму на рисунке 1: один электрон испускает в точке 1 виртуальный фотон, который затем (в точке 2) поглощается другим электроном. В результате обмена электронами фотонами и происходит их рассеяние друг на друге. Читателя не должно ввести в заблуждение то, что линии, представляющие на диаграмме электроны, параллельны друг другу. Ведь это — отнюдь не траектории электронов, а лишь условные представления взаимодействующих частиц.

На рисунке 2 в таблице 23 показаны две диаграммы для рассеяния электрона на электроне в результате обмена уже не одним, а двумя виртуальными фотонами. В данном случае виртуальными являются не только фотоны, но и те электроны, которые выделены на рисунке толстыми линиями (в дальнейшем мы не будем выделять таким образом виртуальные электроны). Если учитывать обмен между электронами лишь с помощью одного фотона, то можно вычислить вероятность электрон-электронного рассеяния, как говорят, в *первом приближении*. Учет обмена двумя фотонами позволяет вычислить вероятность рассеяния несколько более точно (во *втором приближении*). Учет обмена тремя фотонами позволяет еще более уточнить искомую вероятность (*третье приближение*). И так далее.

На рисунке 3 в таблице 23 представлена диаграмма Фейнмана для *рассеяния фотона на электроне (комптоновское рассеяние)*. Здесь виртуальной частицей оказывается электрон (между вершинами 1 и 2). В точке 1 исходный фотон и исходный электрон, взаимодействуя, превращаются в виртуальный электрон, который в точке 2 превращается в конечный электрон и конечный фотон. Сначала фотон поглощается электроном, а потом фотон испускается электроном — это и есть рассеяние фотона на электроне. Оба события (как происходящее в точке 1, так и происходящее в точке 2) обусловлены электромагнитным взаимодействием. (Заметим, что *все без исключения* вершины на диаграммах, представленных в таблице 23, — это события, обусловленные электромагнитным взаимодействием).

Таблица 23. Диаграммы Фейнмана: взаимодействие фотонов, электронов, позитронов



На рисунке 4 предыдущая диаграмма существенно изменена. Теперь испускание фотона (в точке 2) происходит *раньше* поглощения фотона (в точке 1). В данном случае происходящие события получают новую интерпретацию. Обратим внимание на то, что на рисунке 4а виртуальный электрон движется «вспять во времени». Запомним: движение на диаграмме *частицы против времени* эквивалентно движению *античастицы вдоль времени*. В нашем случае «вспять во времени» движется электрон; значит, в обратном направлении, т. е. нормально во времени движется позитрон. Учитывая это, заменим рисунок 4а рисунком 4б, а затем рисунком 4в (напомним, что фотон тождествен со своей античастицей, так что волнистую стрелку можно направлять как по времени, так и против времени). Рисунки 4а, 4б, 4в, по сути дела, эквивалентны. Рассматривая рисунок 4в, мы можем интерпретировать события следующим образом: в точке 2 реальный фотон рождает пару, состоящую из реального электрона и виртуального позитрона, а в точке 1 этот виртуальный позитрон аннигилирует с реальным электроном, в результате чего рождается реальный фотон.

Аннигиляция реального электрона и позитрона с рождением двух фотонов ($e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$) представлена в виде диаграммы Фейнмана на рисунках 5а и 5б. С учетом сделанных ранее замечаний оба рисунка можно считать эквивалентными. Как и в случае с рассеянием фотона на электроне, процесс аннигиляции электрона и позитрона представляется в квантовой электродинамике *двухступенчатым* — он идет через образование виртуального электрона. Как видно на рисунке 5б, сначала исходный электрон превращается в конечный фотон и виртуальный электрон (это событие происходит в точке 1), а затем виртуальный электрон аннигилирует с исходным позитроном и рождается второй конечный фотон.

Процесс *образования электронно-позитронной пары при столкновении двух фотонов* ($\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$) описывается диаграммой, представленной двумя эквивалентными рисунками — рисунком 6а и рисунком 6б. Данный процесс тоже *двухступенчатый* — он идет через образование виртуального позитрона.

Не затрачивая энергии, фотон может родить виртуальную электронно-позитронную пару. Этот процесс изображен на диаграмме, представленной эквивалентными рисунками 7а и 7б в таблице 23.

На рисунках 8а, 8б, 8в в той же таблице представлены три диаграммы Фейнмана для рассеяния фотона на электроне с учетом наличия взаимодействия электрона с *собственным электромагнитным полем*. Как это видно на диаграммах, электрон не только поглощает исходный фотон и

испускает конечный фотон (это происходит в вершинах 1 и 2), но также испускает, а затем поглощает виртуальный фотон (см. вершины 3 и 4), который как раз и является квантом собственного электромагнитного поля электрона. На рисунке 8в представлена ситуация, когда виртуальный фотон «успевает» родить виртуальную электронно-позитронную пару (в вершине 5), которая аннигилирует в вершине 6.

Рисунок 1 в таблице 24 представляет на «языке» диаграмм Фейнмана простейший атом — протон и связанный с ним электромагнитным взаимодействием электрон. Протон удерживает вблизи себя электрон, обмениваясь с ним виртуальными фотонами. Диаграмма учитывает также процесс рассеяния фотона на атомном электроне. Все вершины на диаграмме — это события, обусловленные электромагнитным взаимодействием.

11.7 ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В рамках электромагнитной картины мира все процессы в мире обусловлены двумя фундаментальными взаимодействиями — *гравитационным* и *электромагнитным*. С открытием нейтрона физикам пришлось удвоить число фундаментальных взаимодействий; в картине мира появились еще два взаимодействия — *сильное* и *слабое*.

11.7.1. Гравитационное взаимодействие. Это взаимодействие впервые исследовал *Исаак Ньютон*; он открыл в конце XVII века закон всемирного тяготения. Гравитация (от латинского «гравитас», означающего «тяжесть») управляет глобальными процессами во Вселенной и, в частности, обеспечивает стабильность нашей Солнечной системы. Для относительно медленных движений тел гравитационное взаимодействие достаточно точно описывается механикой Ньютона. В общем случае это взаимодействие описывается общей теорией относительности *Альберта Эйнштейна*.

Заметим, что общая теория относительности не является квантовой теорией гравитационного поля. В этом смысле ее можно уподобить классической электродинамике *Джеймса Максвелла*. Из общих соображений следует, однако, что, как и электромагнитное поле, гравитационное поле при более глубоком его рассмотрении должно быть квантованным. По современным представлениям, переносчиком гравитационного взаимодействия является гипотетическая частица, названная *гравитоном*. Как предсказывают физики-теоретики, гравитон не имеет массы (он движется со скоростью света) и электрического заряда. Его спин равен 2 (гравитон относится к бозонам).

Физики-экспериментаторы довольно давно пытаются обнаружить гравитон, но пока безуспешно. Дело в том, что при обычных плотностях вещества, типичных для земных условий, гравитационное взаимодействие оказывается весьма слабым на характерных не слишком больших расстояниях, доступных изучению в современных экспериментах. По указанной причине эффекты гравитационного взаимодействия в процессах взаимопревращений элементарных частиц в настоящее время не учитываются. Поэтому, обсуждая физику элементарных частиц, ограничимся тремя фундаментальными взаимодействиями — электромагнитным, сильным, слабым.

С будущей квантовой теорией гравитационного поля ученые связывают не только частицы со спином 2, названные гравитоном, но также частицы со спином $3/2$ (им дали название *гравитино*) и частицы со спином 1 (*грави-фотоны*). Следствием существования грави-фотонов могли бы быть эффекты антигравитации.

11.7.2. Электромагнитное взаимодействие. С электромагнитным взаимодействием мы встречаемся, пожалуй, наиболее часто: при рассмотрении электрических и магнитных явлений, свойств вещества и электромагнитного, в частности оптического, излучения. Это взаимодействие определяет строение и свойства атомов и молекул. Оно включает в себя наряду с кулоновскими силами и силами, действующими на проводник с током, также силы давления, трения, сопротивления, упругости, химические силы и т. д. Именно электромагнитным взаимодействием обусловлены физические и химические свойства разнообразных материалов, да и самой живой ткани. Оно же обеспечивает функционирование всей электрической, оптической и электронной аппаратуры, созданной человеком.

Хотя человечество вот уже полтора столетия (начиная с открытий Кулона, Ампера и в особенности Фарадея) активно пользуется электромагнитным взаимодействием, однако физический механизм процессов, обусловленных этим взаимодействием, стал понятен лишь с возникновением квантовой электродинамики — теории, объяснившей электромагнитные процессы на уровне взаимопревращений фотонов, электронов, позитронов. В § 11.6 было достаточно подробно показано, как на «языке» диаграмм Фейнмана представляются различные процессы, рассматриваемые в квантовой электродинамике.

Наряду с фотонами в электромагнитном взаимодействии участвуют не только электроны и позитроны, но и все остальные элементарные частицы из той таблицы, которая будет приведена ниже (см. § 11.10, таблица 26). В том числе и электрически нейтральные частицы. Исключе-

чение составляют лишь нейтрино и антинейтрино. Они не участвуют в превращениях, обусловленных электромагнитным или сильным взаимодействием. Они участвуют только в процессах, обусловленных слабым взаимодействием.

На рисунках 2 в таблице 24 приведена диаграмма Фейнмана для процесса *аннигиляции электрона и позитрона с образованием мюон-антимюонной пары* ($e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$). Оба рисунка эквивалентны — ведь изображаемое на рисунке 2а движение «вспять во времени» частиц e^- и μ^- эквивалентно изображаемому на рисунке 2б естественному движению (движению по оси времени) античастиц e^+ и μ^+ . Вершины 1 и 2 на данной диаграмме — это события, обусловленные электромагнитным взаимодействием.

На рисунке 3 в таблице 24 приведена диаграмма Фейнмана для процесса *распада нейтрального пиона в два фотона* ($\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$). Обратим внимание читателя на то, что в данном процессе участвуют *как электромагнитное, так и сильное взаимодействия*. В вершине 1 нейтральный пион превращается в виртуальную протон-антипротонную пару; это событие обусловлено сильным взаимодействием. В вершине 2 виртуальный протон испускает первый конечный фотон (электромагнитное взаимодействие), а в вершине 3 происходит аннигиляция виртуальных протона и антипротона с образованием второго конечного фотона (тоже электромагнитное взаимодействие).

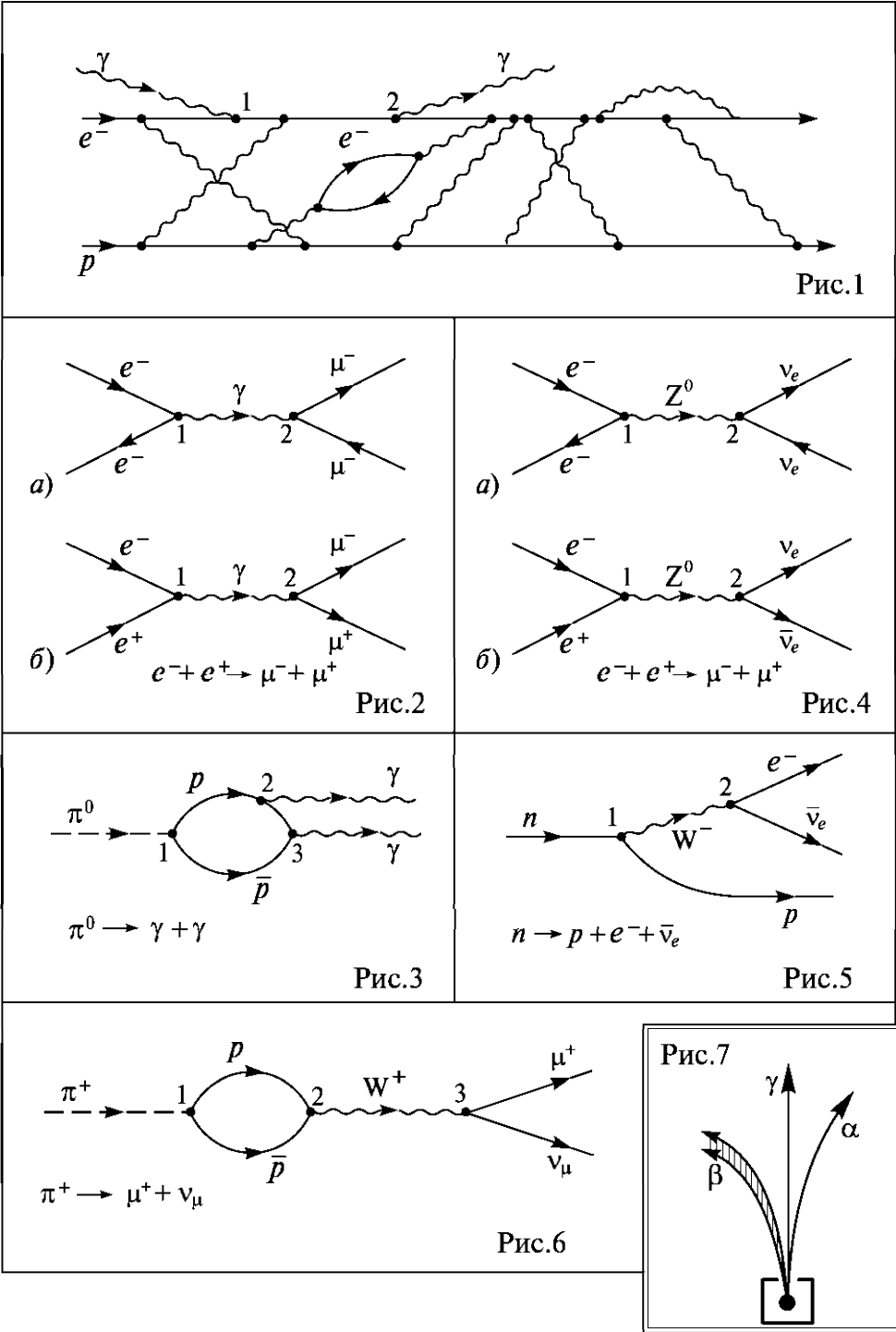
Читатель не должен подсчитывать энергию π^0 -мезона, необходимую для того, чтобы тот мог породить протон-антипротонную пару, поскольку эта пара *виртуальная*. По той же причине не следует оценивать энергию второго фотона, исходя из энергий покоя протона и антипротона. Энергию фотонов, образующихся при распаде π^0 -мезона, определяют, используя законы сохранения энергии и импульса для реальных частиц:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{(m_\pi c^2)^2 + (p_\pi c)^2} &= p'_\gamma c + p''_\gamma c; \\ \mathbf{p}_\pi &= \mathbf{p}'_\gamma + \mathbf{p}''_\gamma. \end{aligned} \right\} \quad (*)$$

Здесь $\mathbf{p}_\pi$, $\mathbf{p}'_\gamma$, $\mathbf{p}''_\gamma$ — импульсы π^0 -мезона и фотонов, соответственно; в левой половине первого равенства стоит релятивистская энергия π^0 -мезона (напомним соотношение (17) из § 6.5), а в правой половине стоит сумма энергий фотонов, образующихся при распаде π^0 -мезона.

11.7.3. Сильное взаимодействие. Сильное взаимодействие обеспечивает существование мощных *ядерных сил*, связывающих нуклоны в атомном ядре (и превалирующих над кулоновскими силами отталкивания протонов друг от друга). Оно отвечает также за многообразные *ядерные реакции*. В частности, оно отвечает за процессы распада ядер урана или

Таблица 24. Диаграммы Фейнмана: электромагнитное, слабое, сильное взаимодействия



плутония, происходящие в активной зоне атомного реактора. (Заметим, что за рождение электронных антинейтрино в активной зоне реактора ответственно слабое взаимодействие — антинейтрино рождаются в процессах β -распада ядер-осколков. Сами же ядра-осколки образуются в сильном взаимодействии — при делении ядер урана или плутония.)

В отличие от гравитационного и электромагнитного взаимодействий сильное взаимодействие является *короткодействующим* — оно проявляется лишь на расстояниях, не превышающих примерно 10^{-13} см, чем и обусловлен малый диаметр атомных ядер (приблизительно от 10^{-13} см до 10^{-12} см для различных ядер).

Ядерные силы притяжения между нуклонами в атомных ядрах — это лишь одно из проявлений сильного взаимодействия. Переносчиками сильного взаимодействия являются в данном случае π -мезоны (пионы). Мы поговорим об этом подробнее в § 11.8, где и познакомимся с пионами поближе.

Появление и развитие в середине 60-х годов прошлого столетия идеи *кварковой структуры* элементарных частиц, которым присуще сильное взаимодействие (эти частицы, в том числе нуклоны и π -мезоны, объединяют общим термином «адроны»), привело ученых к выводу, что в общем случае в качестве переносчиков сильного взаимодействия следует рассматривать *частицы, связывающие друг с другом кварки в адронах*. Эти частицы были названы *глюонами*. О кварках и глюонах мы поговорим позднее, в теме 12.

11.7.4. Слабое взаимодействие. Создание объединенной теории слабого и электромагнитного взаимодействий. Тем, кто не является специалистами в физике или астрономии, слабое взаимодействие известно в меньшей степени, чем гравитационное, электромагнитное или сильное взаимодействия. Однако слабое взаимодействие играет в окружающем мире исключительно важную роль. Если бы вдруг оно исчезло, то погасли бы Солнце и все звезды, поскольку с исчезновением слабого взаимодействия исчезла бы и принципиально важная реакция «сгорания протонов» с образованием дейтрона d (ядра тяжелого водорода):



Подчеркнем, что участие в том или ином процессе нейтрино или антинейтрино есть достаточное (хотя и не необходимое) условие для заключения о причастности слабого взаимодействия к данному процессу. Уже знакомые нам реакции (6), (7), (8) — это процессы, обусловленные слабым взаимодействием. Процессы β -распада радиоактивных ядер идут

с образованием нейтрино (антинейтрино) — это тоже проявление слабого взаимодействия. Вместе с тем наблюдаются и безнейтринные процессы слабого взаимодействия; к ним относятся, например, процессы распада гиперонов (см. § 11.9). Как будет показано в теме 14, роль нейтрино (антинейтрино) в современной космологии исключительно велика. Это говорит о важной роли слабого взаимодействия в общей картине Вселенной.

Слабое взаимодействие является *еще более короткодействующим*, нежели сильное. Его радиус действия в 1000 раз меньше и оценивается около $2 \cdot 10^{-16}$ см. Как станет понятно из § 11.8, столь малый радиус слабого взаимодействия указывает на то, что его переносчиками должны быть весьма массивные частицы — с массой порядка $10^5 m_e$.

Каковы же в действительности переносчики слабого взаимодействия? Ответ на этот вопрос сегодня известен. Но получен он был не так давно. Первоначально полагали, что слабое взаимодействие реализуется вообще без каких-либо переносчиков, при точечном контакте взаимодействующих частиц. Так считали до 60-х годов прошлого столетия — до того, как американские физики *Стивен Вайнберг* (1933–1996) и *Шелдон Глэшоу* (род. 1932 г.) и пакистанский физик *Абдус Салам* (1926–1995) создали теорию, в рамках которой получили объяснение процессы как со слабым взаимодействием, так и с электромагнитным взаимодействием (т. н. *теория электрослабого взаимодействия*). В 1979 году эти ученые были удостоены Нобелевской премии «за вклад в объединенную теорию слабого и электромагнитного взаимодействий между элементарными частицами» (именно такова была формулировка в Нобелевских дипломах лауреатов премии). Согласно новым представлениям, переносчиками слабого взаимодействия являются три массивных бозона со спином 1, названные *промежуточными векторными бозонами*, — два заряженных (W^+ и W^-) и один нейтральный (Z^0). Масса бозонов W^+ и W^- оценивалась в 160 000 m_e , а масса Z^0 -бозона — 180 000 m_e .

На рисунках 4 в таблице 24 представлена диаграмма Фейнмана для процесса *аннигиляции электронно-позитронной пары с образованием нейтрино-антинейтринной пары* ($e^- + e^+ \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$) (оба рисунка эквивалентны). В вершине 1 диаграммы электронно-позитронная пара, аннигилируя, рождает виртуальный Z^0 -бозон, который в вершине 2 превращается в пару нейтрино и антинейтрино (налицо характерный для квантовой теории поля двухступенчатый процесс с участием промежуточной виртуальной частицы)

Процесс *распада нейтрона* представляется теперь также двухступенчатым процессом — см. диаграмму на рисунке 5 в той же таблице. В

вершине 1 нейтрон превращается в протон и виртуальный W^- -бозон. В вершине 2 виртуальный W^- -бозон превращается в электрон и электронное антинейтрино.

На рисунке 6 в таблице 24 показана диаграмма Фейнмана для процесса распада π^+ -мезона ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$). В вершине 1 диаграммы π^+ -мезон превращается в виртуальную протон-антипротонную пару (это событие обусловлено сильным взаимодействием). В вершине 2 протон-антипротонная пара превращается в виртуальный W^+ -бозон, который в вершине 3 превращается в антимюон и мюонное нейтрино. За события, происходящие в вершинах 2 и 3 ответственно слабое взаимодействие.

В 80-х годах в Европейском центре ядерных исследований в Женеве начал функционировать особо мощный ускоритель (*коллайдер*), в котором сталкивались *встречные пучки* протонов и антипротонов, ускоренных до энергии 270 ГэВ. На таком ускорителе итальянский физик *Карло Руббиа* (род. 1934 г.) и нидерландский физик *Симон Ван-дер-Мер* (род. 1925 г.) экспериментально обнаружили в 1983 году промежуточные векторные бозоны. Их массы оказались в прекрасном согласии с теоретическими расчетами.

11.7.5. Несколько фундаментальных взаимодействий и изобилие процессов. Всего несколько фундаментальных взаимодействий обуславливают поистине бесчисленное количество разнообразных процессов, в которых участвуют элементарные частицы. Различные процессы характеризуются *величиной энергии*, которая выделяется (затрачивается) в том или ином процессе, а также *длительностью протекания* процесса (насколько быстро он завершается).

На длительность процесса влияет тип фундаментального взаимодействия, отвечающего за данный процесс. Принято говорить, что процессы, обусловленные сильным взаимодействием, протекают быстрее (и значит, интенсивнее), чем электромагнитные процессы, а последние протекают быстрее (интенсивнее) по сравнению с процессами, обусловленными слабым взаимодействием. Это действительно так, но при условии, что процессы сравниваются при одинаковых энергиях. Обычно сравнение проводится при энергии порядка 1 ГэВ. В этом случае процессы с сильным взаимодействием происходят за время порядка 10^{-24} с, процессы с электромагнитным взаимодействием — за время порядка 10^{-20} – 10^{-21} с, процессы со слабым взаимодействием — за время порядка 10^{-9} – 10^{-10} с. В связи с этим принято считать, что сильное взаимодействие характеризуется самой большой интенсивностью, а слабое — наименьшей интенсивностью (отсюда, кстати, и происходят эмоционально

окрашенные термины «сильное взаимодействие» и «слабое взаимодействие»).

Однако правильнее говорить об интенсивности не самих фундаментальных взаимодействий, а о вызванных ими процессах. Дело в том, что для того или иного фундаментального взаимодействия различные процессы будут иметь разную длительность (разную интенсивность) в зависимости от энергии, высвобождаемой или затрачиваемой в процессе. *С ростом энергии уменьшается длительность (увеличивается интенсивность) процессов, обусловленных одним и тем же взаимодействием.*

Подчеркнем, что интенсивность процессов, обусловленных слабым взаимодействием, растет с увеличением энергии весьма быстро. Так, при распаде нейтрона выделяется сравнительно немного энергии (порядка 1 МэВ), поэтому длительность данного распада велика — 10^3 с. А вот при распаде Λ^0 -гиперона выделяется энергия порядка 100 МэВ — и длительность распада сокращается до 10^{-10} с (процесс распада идет существенно интенсивнее по сравнению с нейтронным распадом). А ведь как тот, так и другой распад обусловлены слабым взаимодействием! При высоких энергиях, достижимых на современных ускорителях с встречными протон-антипротонными пучками (энергия порядка 100 ГэВ) обмен тяжелыми промежуточными векторными бозонами происходит столь же эффективно, как и обмен фотонами; при таких энергиях интенсивности слабого и электромагнитного взаимодействий могут стать одного порядка. Как заметил профессор А.С. Кондратьев, «при очень высоких энергиях слабое взаимодействие может стать даже сильнее электромагнитного. Здесь законы обычной электродинамики уже не работают. Правильное описание процессов дает новая теория — теория электро-слабого взаимодействия, учитывающая как обмен фотонами, так и обмен промежуточными векторными бозонами. Эта теория продолжает теорию Максвелла в область малых расстояний или, что то же самое, в область высоких энергий».

Обратим внимание читателя также и на то обстоятельство, что *один и тот же* процесс может быть обусловлен *разными* фундаментальными взаимодействиями. Выше мы приводили диаграммы Фейнмана для процесса распада π^0 -мезона и процесса распада π^+ -мезона (рисунки 3 и 6 в таблице 24). Энергии обоих процессов одного порядка. Но первый распад ($\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$) обусловлен сильным и электромагнитным взаимодействиями, а второй распад ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) сильным и слабым взаимодействиями. В результате первый распад оказывается более интенсивным (длительность процесса порядка 10^{-16} с) по сравнению со вторым распадом (длительность процесса порядка 10^{-8} с).

Завершая обсуждение фундаментальных взаимодействий, напомним наверняка знакомый читателю рисунок — см. рисунок 7 в таблице 24. Его можно встретить во многих учебниках по физике, в том числе школьных. Он иллюстрирует три типа распада атомных ядер — α -распад, β -распад и γ -распад. В магнитном поле положительно заряженные α -частицы отклоняются в одну сторону, а отрицательно заряженные β -частицы (электроны) — в другую; γ -излучение магнитным полем не отклоняется. На представленном рисунке линии индукции магнитного поля предполагаются направленными перпендикулярно к плоскости рисунка навстречу наблюдателю. Данный рисунок можно рассматривать как символ трех фундаментальных взаимодействий, поскольку α -распад обусловлен сильным взаимодействием, β -распад — слабым взаимодействием, а γ -распад — электромагнитным взаимодействием.

11.8 ПИОНЫ КАК ПЕРЕНОСЧИКИ СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, СВЯЗЫВАЮЩЕГО НУКЛОНЫ В АТОМНЫХ ЯДРАХ

Обсуждая слабое взаимодействие, мы добрались до 1983 года — года, когда были экспериментально обнаружены промежуточные векторные бозоны. Чтобы сохранить общую историческую канву повествования, мы должны теперь вернуться мысленно назад — в 30-е годы прошлого столетия, к тому времени, когда сформировалось представление о том, что частицы взаимодействуют, *обмениваясь квантами соответствующего поля*.

В 1935 году японский физик *Хидоки Юкава* (1907–1981) приблизительно оценил массу кванта, который мог бы играть роль переносчика взаимодействия, связывающего нуклоны в ядре атома. Он исходил из того, что радиус действия ядерных сил $l \approx 10^{-13}$ см, и значит, кванту потребуется время $\tau \approx l/c \approx 3 \cdot 10^{-24}$ с для того, чтобы преодолеть расстояние между двумя соседними нуклонами (здесь c — скорость движения кванта, которую для приблизительной оценки можно считать равной скорости света). Энергия ϵ испускаемого протоном или нейтроном виртуального кванта ядерного поля определяется величиной разброса энергий, допускаемого соотношением неопределенностей Гейзенберга:

$$\epsilon \approx \frac{h}{2\pi\tau} \approx \frac{hc}{2\pi l}. \quad (*)$$

Масса, эквивалентная этой энергии, есть

$$m = \epsilon/c^2 \approx h/(2\pi lc). \quad (13)$$

Подставив в (13) $h = 6,6 \cdot 10^{-27}$ эрг·с, $l = 10^{-13}$ см, $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с, Юкава нашел, что $m \approx 3,5 \cdot 10^{-25}$ г. Поскольку масса электрона равна $0,9 \cdot 10^{-27}$ г, то получалось, что масса кванта ядерного поля (переносчик взаимодействия между нуклонами) должна равняться примерно тремстам—четыремстам массам электрона. (*Примечание:* из (13) следует, что если радиус действия сил уменьшить в 1000 раз, то масса переносчика взаимодействия возрастет в 1000 раз и составит примерно 300 000 электронных масс; это близко к измеренной в 1983 году массе промежуточных векторных бозонов — переносчиков слабого взаимодействия.)

Итак, переносчики сильного взаимодействия должны иметь массу, промежуточную между массой электрона и массой нуклона; поэтому их заранее поименовали *мезонами* (от греческого «мезос», означающего «средний»). Начался поиск мезонов в космическом излучении. В 1937 году *Карл Андерсон* обнаружил отрицательно и положительно заряженные частицы с массой $207 m_e$; их стали обозначать символами соответственно μ^- и μ^+ и называть «мю-мезонами». Выяснилось, что μ^- — это частица, а μ^+ — античастица. Все были убеждены, что это и есть те самые переносчики сильного взаимодействия, существование которых предсказал два года назад Юкава. Однако, как показали дальнейшие исследования, «мю-мезоны» в сильном взаимодействии не участвуют и ведут себя подобно электронам (позитронам). Их следовало, скорее, рассматривать как тяжелые электроны (позитроны).

Поиски переносчиков сильного взаимодействия продолжались. И вот в 1947 году английский физик *Сесил Франк Пауэлл* (1903–1969), применив разработанный им метод регистрации треков частиц в специальных фотоэмульсиях, обнаружил в космическом излучении заряженные частицы с массой $273 m_e$, которые, как оказалось, можно было по праву считать переносчиками сильного взаимодействия. Открытые Пауэллом частицы называли *пи-мезонами* (или, проще, *пионами*) и стали обозначать символами π^+ и π^- . Через три года были открыты нейтральные пионы с массой $264 m_e$; их обозначили символом π^0 . Что же касается «мю-мезонов», то они лишились термина «мезоны» и стали в дальнейшем именоваться мюонами.

Отметим, что мюоны и пионы весьма существенно различаются по своим свойствам. Мюоны, как уже отмечалось, не участвуют в сильном взаимодействии (не вступают ни в какие ядерные реакции), а пионы, напротив, участвуют и весьма активно. У мюонов спин равен $1/2$; они являются фермионами. У пионов спин равен нулю; они являются бозонами. Мюоны существуют в двух обличьях: μ^- (частица) и μ^+ (античастица). Пионы существуют в трех обличьях: π^+ (частица), π^- (античасти-

ца) и π^0 (*истинно нейтральная частица*: подобно фотону, она тождественна со своей античастицей). Время жизни мюонов $2,2 \cdot 10^{-6}$ с; они распадаются самопроизвольно (спонтанно) по схемам:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e; \quad (14a)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e. \quad (14b)$$

Нелишне заметить, что распад, например, мюона μ^- на электрон, мюонное нейтрино и электронное антинейтрино не означает, что мюон состоял из этих трех частиц; все они образовались в процессе распада мюона. Так что фактически мы имеем дело не с распадом в обычном понимании, а с *превращением* — превращением одной частицы в три новых частицы. Пионы «живут» значительно меньшее время по сравнению с мюонами. Время жизни заряженных пионов $2,6 \cdot 10^{-8}$ с; схемы распада:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu; \quad (15a)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \quad (15b)$$

Фейнмановская диаграмма для процесса (15a) была дана на рисунке 6 в таблице 24. Пауэлл открыл заряженные пионы, используя именно этот процесс.

Нейтральные пионы распадаются самопроизвольно в основном по схеме:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (16a)$$

и изредка (в одном случае из ста) по схеме:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + e^- + e^+. \quad (16b)$$

Фейнмановская диаграмма для процесса (16a) была дана на рисунке 3 в таблице 24. Открытие π^0 -мезона в 1950 году произошло с использованием этого процесса (были зарегистрированы пары фотонов). Время жизни π^0 -мезона значительно меньше времени жизни заряженных пионов; оно составляет $0,8 \cdot 10^{-16}$ с. Объяснение этому было дано в предыдущем параграфе.

На рисунках 1 в таблице 25 приведены фейнмановские диаграммы, раскрывающие механизм сильного взаимодействия, которое связывает друг с другом два нуклона (нуклоны — сплошные прямые линии, пионы — пунктирные линии). Учитывая проведенное в предыдущих параграфах обсуждение диаграмм Фейнмана для различных процессов, мы вправе рассчитывать, что читатель сможет самостоятельно «прочитать»

диаграммы на рисунках 1. Для примера рассмотрим лишь рисунок 1а. Здесь механизм сильного взаимодействия выглядит так: в вершине 1 исходный протон испускает виртуальный π^+ -мезон, превращаясь при этом в конечный нейтрон, а в вершине 2 виртуальный π^+ -мезон поглощается исходным нейтроном, превращаясь в конечный протон. Таким образом, произошло превращение двух исходных нуклонов (нейтрона и протона) в два конечных нуклона (нейтрон и протон); это превращение длилось время $\tau \approx 10^{-24}$ с, в течение которого функционировал переносчик взаимодействия — виртуальный π^+ -мезон с энергией $\epsilon \approx \hbar/2\pi\tau$.

НЕЗАПЛАНИРОВАННЫЙ ДИАЛОГ

Читатель. Я допускаю, что энергия виртуального пиона была временно «взята» из вакуума. Но как быть в данном случае с *реальными* частицами?

Автор. А в чем же тут проблема?

Читатель. Пусть m_n — масса нейтрона, а m_p — масса протона. Как известно, $m_n > m_p$. Обозначим: $m_n - m_p = \Delta m$. В вершине 1 диаграммы реальный протон превращается в реальный нейтрон. Возникает вопрос: откуда взялась энергия $\Delta m \cdot c^2$? Ведь вряд ли требуется ускорять нуклоны для того, чтобы они провзаимодействовали друг с другом.

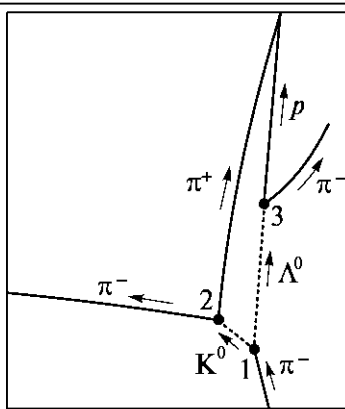
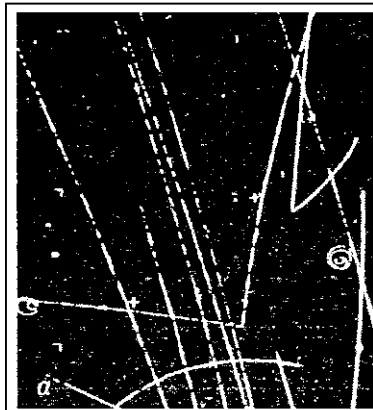
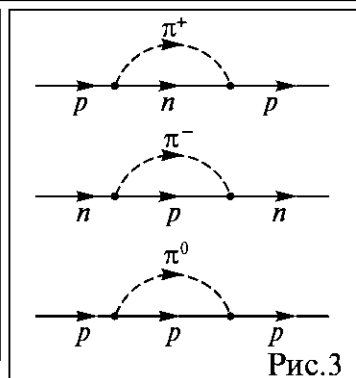
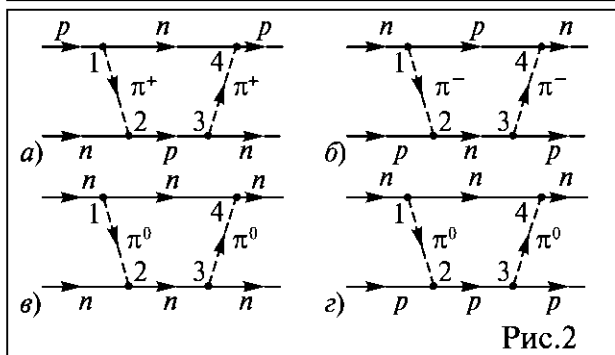
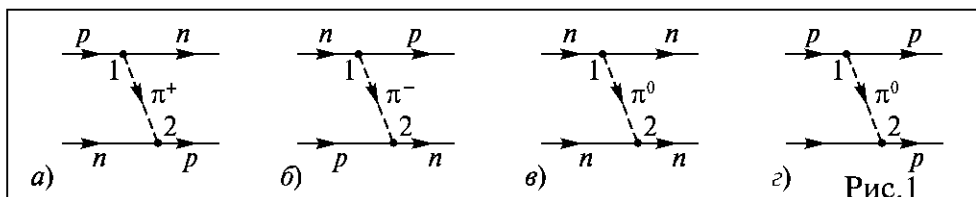
Автор. Разумеется, их ускорять не требуется. А что касается «недостачи» энергии $\Delta m \cdot c^2$ при превращении частиц, происходящем в вершине 1, то она как раз компенсируется «излишком» энергии $\Delta m \cdot c^2$ при превращении частиц, происходящем в вершине 2.

Читатель. Однако событие в вершине 1 происходит раньше, чем произойдет событие в вершине 2!

Автор. Для квантовой теории подобные «детали», связанные с очередностью элементарных актов, по сути дела, значения не имеют. Соотношение неопределенностей позволяет исходному протону временно «взять» в вершине 1 энергию $\Delta m \cdot c^2$ из вакуума с тем, чтобы «вернуть» ее в вакуум в вершине 2. Важно, что в исходном состоянии есть протон и нейтрон с некоторой суммарной энергией и в конечном состоянии есть протон и нейтрон с такой же суммарной энергией. Принципиально невозможно экспериментально доказать, что конечный нейтрон образовался от исходного протона, а конечный протон — от исходного нейтрона.

На рисунках 2 в таблице 25 нуклоны обмениваются друг с другом не одним, а парой виртуальных пионов. Рассмотрим для примера рисунок 2а. В вершине 1 исходный протон превращается в виртуальный нейтрон и первый виртуальный π^+ -мезон. В вершине 2 виртуальный π^+ -мезон и

Таблица 25. Пионы и нуклоны. Странные частицы



В точке 1:
 $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$
 В точке 2:
 $K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$
 В точке 3:
 $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$

Рис.4

	S=-3	S=-2	S=-1	S=0	S=+1	S=+2	S=+3
Частицы	Ω^-	Ξ^0 Ξ^-	Λ^0 Σ^- Σ^0 Σ^+	e^- ν_e μ^- ν_μ π^+ p n	K^0 K^+		
Анти-частицы			$\bar{K}^0$ K^-	γ π^0 η^0 π^- $\bar{p}$ $\bar{n}$ e^+ $\bar{\nu}_e$ μ^+ $\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\Lambda}^0$ $\bar{\Sigma}^-$ $\bar{\Sigma}^0$ $\bar{\Sigma}^+$	$\bar{\Xi}^0$ $\bar{\Xi}^-$	$\bar{\Omega}^-$

Рис.5

исходный нейтрон превращаются в виртуальный протон, который в вершине 3 превращается в конечный нейтрон и второй виртуальный π^+ -мезон. Этот π^+ -мезон и виртуальный нейтрон превращаются в вершине 4 в конечный протон. Диаграммы на рисунках 2б, 2в, 2г читатель вполне может «прочитать» самостоятельно.

Итак, нуклоны в атомном ядре взаимодействуют друг с другом (притягиваются друг к другу), *обмениваясь виртуальными пионами*. Как заряженными, так и нейтральными. Времени жизни пионов (даже нейтральных пионов) вполне достаточно, чтобы обмен успел произойти; ведь для него требуется время порядка 10^{-24} с.

Одиночный нуклон также испускает виртуальные пионы (заряженные и нейтральные); он же их и поглощает. Эти пионы образуют, как выражаются физики, «*мезонную шубу*», плотно окружающую нуклон. Ее энергия заимствуется из вакуума. На рисунках 3 в таблице 25 приведены фейнмановские диаграммы, поясняющие механизм образования «мезонной шубы».

Какая-то часть пионов, оказавшихся внутри «мезонной шубы», может превратиться в реальные пионы, если нуклону будет сообщена соответствующая энергия. Ее можно сообщить, например, «обстреливая» нуклон фотонами с достаточно высокой энергией. В этом случае наблюдают явление *фоторождения пионов на нуклонах*; оно может происходить в соответствии с разными схемами:

$$\gamma + n \rightarrow \pi^0 + n; \quad \gamma + n \rightarrow \pi^- + p; \quad \gamma + p \rightarrow \pi^0 + p; \quad \gamma + p \rightarrow \pi^+ + n. \quad (17)$$

Законы сохранения энергии и импульса показывают, что минимальная (пороговая) энергия фотона, необходимая для фоторождения одного нуклона, составляет примерно 150 МэВ.

Вместо фотонов можно «обстреливать» нуклон другими нуклонами, например протонами. В этом случае может наблюдаться явление *рождения пионов при столкновении двух нуклонов*. Процесс может происходить в соответствии с разными схемами:

$$\left. \begin{aligned} p + p &\rightarrow \pi^0 + p + p; & p + p &\rightarrow \pi^+ + n + p; \\ p + n &\rightarrow \pi^0 + p + n; & p + n &\rightarrow \pi^+ + n + n; \\ p + n &\rightarrow \pi^- + p + p. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

При этом необходимо, чтобы кинетическая энергия протона, налетающего на покоящийся нуклон (протон или нейтрон), была выше пороговой энергии, равной 290 МэВ. Это следует из законов сохранения энергии и импульса.

11.9 СТРАННЫЕ ЧАСТИЦЫ

11.9.1. Открытие странных частиц. Три события весьма существенно расширили возможности исследования элементарных частиц. **Первое событие** — открытие в 1944 году академиком *Владимиром Иосифовичем Векслером* (1901–1966) и независимо от него в 1945 году американским физиком *Эдвином Маттисоном Макмилланом* (1907–1991) *принципа автофазировки частиц*, позволившего создать ускорители заряженных частиц (синхротрон, фазотрон, синхрофазотрон, микротрон), в которых частицы разгоняются до энергий от десятков МэВ до десятков и даже сотен ГэВ. **Второе событие** — разработка в 1947 году *Сесилом Пауэллом* метода регистрации треков частиц в *специальной фотоэмульсии*. **Третье событие** — изобретение в 1952 году американским физиком *Дональдом Артуром Глазером* (род. 1926 г.) *пузырьковой камеры*. В камере Вильсона след от заряженной частицы обнаруживался благодаря тому, что заполняющий камеру пересыщенный пар *конденсировался* на ионах, образующихся вдоль траектории частицы. В пузырьковой же камере след пролетающей заряженной частицы фиксируется благодаря *вскипанию* перегретой жидкости вдоль траектории частицы. В качестве жидкости применяют, например, жидкий водород или пропан.

Ускорители, фотоэмульсии, пузырьковые камеры — все это привело, в конечном счете, к открытию в 50-х годах прошлого столетия целой группы элементарных частиц, которым физики дали общее достаточно эмоциональное название — *странные частицы*.

В группу странных частиц входят, во-первых, два бозона со спином 0: положительно заряженный K^+ -мезон и нейтральный K^0 -мезон (с массами соответственно $966 m_e$ и $974 m_e$) и их античастицы — K^- -мезон и $\bar{K}^0$ -мезон. Общее название — *каоны*. Во-вторых, сюда входят шесть фермионов со спином $1/2$, имеющих массу от $2200 m_e$ до $2600 m_e$, плюс шесть античастиц. Их называли *гиперонами* (антигиперонами). Гипероны (в порядке возрастания массы): Λ^0 , Σ^+ , Σ^0 , Σ^- , Ξ^0 , Ξ^- . Антигипероны: $\bar{\Lambda}^0$, $\bar{\Sigma}^+$, $\bar{\Sigma}^0$, $\bar{\Sigma}^-$, $\bar{\Xi}^0$, $\bar{\Xi}^-$. Первые странные частицы были открыты в космическом излучении: K^+ и K^- (в 1947 году) и Λ^0 (в 1951 году). Последующие открытия и исследования странных частиц проводились на ускорителях заряженных частиц. В 1964 году был открыт еще один гиперон — отрицательно заряженный Ω^- -гиперон (со спином $3/2$ и массой $3273 m_e$). Его античастица ($\bar{\Omega}^-$) экспериментально обнаружена в 1971 году.

Почему все эти частицы были названы «странными»? Что странного обнаружили в них ученые? Странностей было две. Во-первых, все эти частицы рождались в сильном взаимодействии, а распадались настолько медленно (каоны за время порядка 10^{-8} с, а гипероны — 10^{-10} с), что это определенно связывалось со слабым взаимодействием. Их время жизни было на 14–16 порядков больше времени, затраченного на рождение. Казалось бы, при столь значительных массах эти частицы должны были бы «охотно» распадаться на различные более легкие частицы за счет сильного или электромагнитного взаимодействия. Но что-то не позволяло им делать это. Во-вторых, все новые частицы рождались не поодиночке, а *обязательно парами и более*, что было, конечно, удивительно. Вот некоторые наблюдаемые процессы с рождением странных частиц:

$$p + p \rightarrow \begin{cases} K^+ + \Lambda^0 + p; \\ K^0 + \Sigma^+ + p; \\ K^+ + \Lambda^0 + n + \pi^+; \end{cases} \quad \pi^- + p \rightarrow \begin{cases} K^0 + \Lambda^0; \\ K^+ + \Sigma^-; \\ K^+ + K^- + n; \\ K^+ + K^0 + \Xi^-. \end{cases} \quad (19)$$

Нет ни одного процесса, в котором среди конечных частиц была бы обнаружена *одна* странная частица. Их должно быть *по крайней мере две*. Это казалось странным.

А вот некоторые схемы распада странных частиц:

$$\left. \begin{aligned} K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu; & \Lambda^0 &\rightarrow n + \pi^0; \\ K^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^0; & \Sigma^+ &\rightarrow p + \pi^0; \\ K^0 &\rightarrow \pi^- + \pi^+; & \Sigma^- &\rightarrow n + \pi^-. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Здесь странная частица распадается на «нестранные». Однако наблюдаются случаи, когда среди продуктов распада странной частицы присутствуют странная и «нестранная» частица или две странных частицы:

$$\left. \begin{aligned} \Xi^0 &\rightarrow \Lambda^0 + \pi^0; & \Omega^- &\rightarrow \Lambda^0 + K^-; \\ \Xi^- &\rightarrow \Lambda^0 + \pi^-; & \Omega^- &\rightarrow \Xi^0 + \pi^-. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Обратим внимание читателя на то, что во всех приведенных схемах распада странных частиц (за исключением схемы $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) продуктами распада являются частицы, *активно участвующие в сильном взаимодействии*. Почему бы, спрашивается, всем этим процессам распада не происходить за счет сильного взаимодействия?

На рисунке 4 в таблице 25 приведена полученная в жидководородной пузырьковой камере фотография процесса, в котором сначала произошло рождение K^0 -мезона и Λ^0 -гиперона при столкновении антипиона π^- с протоном, а затем наблюдался распад как одной, так и другой странной частицы. В точке 1 произошла реакция $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$. Следы K^0 -мезона и Λ^0 -гиперона в камере не образуются, поскольку эти частицы не имеют заряда. Они регистрируются по реакциям распада: в точке 2 произошел распад $K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$, а в точке 3 — распад $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$.

11.9.2. Закон сохранения странности. Для объяснения странного поведения странных частиц американский физик *Мюррей Гелл-Манн* (род. 1929 г.) и независимо от него японский физик *Кацухико Нишиджима* (род. 1926 г.) в 1953 году ввели для элементарных частиц *новый закон сохранения*, выполняющийся в сильном и электромагнитном взаимодействиях и не выполняющийся в слабом взаимодействии. Так в физике появилась новая характеристика элементарной частицы, новое квантовое число. Его называли *странностью* (S).

У всех «нестранных» частиц $S = 0$, у каонов $S = +1$, у лямбда- и сигма-гиперонов $S = -1$, у кси-гиперонов $S = -2$, у омега-гиперона $S = -3$. Странность античастиц имеет знак, противоположный знаку соответствующих частиц. На рисунке 5 в таблице 25 изображена схема, на которой все элементарные частицы (те, что будут приведены в § 11.10) распределены по соответствующим значениям странности.

Закон сохранения странности формулируется так: *в процессах, обусловленных сильным или электромагнитным взаимодействием, суммарная странность исходных частиц должна равняться суммарной странности конечных частиц*. Что же касается процессов, обусловленных слабым взаимодействием, то в них закон сохранения странности может не выполняться; при этом разность ΔS между суммарной странностью исходных и конечных частиц подчиняется равенству $|\Delta S| = 1$.

Читатель может легко убедиться, что суммарная странность конечных частиц в процессах (19), обусловленных сильным взаимодействием, равна нулю, т. е. равна суммарной странности исходных частиц. Он может также убедиться, что суммарная странность конечных частиц в процессах (20) и (21), обусловленный слабым взаимодействием, отличается на единицу от странности исходной частицы.

Так закон сохранения странности объясняет, почему странные частицы рождаются парами или в большем числе и почему они «вынуждены» распадаться за счет слабого взаимодействия несмотря на свою достаточно большую массу и то, что продуктами распада являются частицы, активно участвующие в сильном взаимодействии.

11.10 «ДОЛГОЖИВУЩИЕ» ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ОТКРЫТЫЕ ДО 1965 ГОДА

Полный перечень таких элементарных частиц представлен в таблице 26. В предыдущих параграфах мы уже встречались со всеми частицами из этой таблицы за исключением одной — эта-нуль-мезона (η^0), являющейся наряду с фотоном и нейтральным пионом истинно нейтральной частицей.

Всего в таблице шестнадцать частиц и шестнадцать античастиц плюс три истинно нейтральных частицы (у них частица и античастица тождественны). Итого $16 + 16 + 3 = 35$ элементарных частиц. Они рассматриваются как «долгоживущие», поскольку у них время жизни больше 10^{-20} с. Читателю, наверное, трудно считать долгоживущими, например, π^0 -мезон (время жизни $8,3 \cdot 10^{-17}$ с) или, тем более, Σ^0 -гиперон (время жизни $5,8 \cdot 10^{-20}$ с). Но все познается в сравнении. С начала 60-х годов физики стали открывать большое число крайне неустойчивых частиц с массами порядка и больше тысячи электронных масс и временем жизни всего 10^{-22} – 10^{-23} с. Их называли *резонансами*. По своим характеристикам резонансы относятся к мезонам и гиперонам. Вот только распадаются они за счет сильного взаимодействия. В настоящее время полный перечень известных элементарных частиц превышает 300 частиц; в основном это резонансы.

Таблица 26 составлена, естественно, без учета резонансов. В теме 12 мы дополним ее рядом «долгоживущих» частиц, открытых после 1965 года. Приведенные в таблице сведения о массе и времени жизни частиц, а также схемах их распада уточнялись в непрерывно продолжающихся экспериментальных исследованиях элементарных частиц. При этом постепенно накапливались статистические данные, позволившие выявить с достаточной точностью *относительную вероятность той или иной схемы распада* для различных типов частиц. Эти вероятности даны в столбце 12 таблицы 26; они соответствуют данным, накопленным к началу 90-х годов. Оказалось, например, что примерно 64% случаев распада Λ^0 -гиперона осуществляются по схеме $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$, а 36% случаев распада — по схеме $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0$; отсюда следовало, что относительная вероятность распада Λ^0 -гиперона по первой схеме равна 0,64, а по второй схеме — 0,36.

Заметим, что примерно половина распадов K^0 -мезона (равно как и $\overline{K}^0$ -мезона) происходит весьма быстро — с временем жизни, равным $8,9 \cdot 10^{-11}$ с, а половина — относительно медленно, с временем жизни $5,2 \cdot 10^{-8}$ с. Короткоживущие

Таблица 26. «Долгоживущие» элементарные частицы, открытые до 1965 года

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Фотон			γ		0	1	0	0	0	0	Стабилен	—	
Лептоны	Электрон	e^-	e^+	1	1/2	-1	+1	0	0	0	Стабилен	—	
	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	1/2	0	+1	0	0	0	Стабильно	—	
	Мюон	μ^-	μ^+	207	1/2	-1	+1	0	0	0	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_0$	≈ 1
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	1/2	0	+1	0	0	0	Стабильно	—	
Адроны	Пионы	π^0		264	0	0	0	0	0	0	$8,3 \cdot 10^{-17}$	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ $\pi^0 \rightarrow \gamma e^-$	0,99 0,01
		π^+	π^-	273	0	+1	0	0	0	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	≈ 1
	Каоны	K^+	K^-	966	0	+1	0	0	+1		$1,24 \cdot 10^{-8}$	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi_0$ $K^+ \rightarrow e^+ \pi^0 \nu_e$ $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ $K^+ \rightarrow \mu^+ \pi^0 \nu_\mu$ $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$	0,63 0,21 0,05 0,05 0,03 0,02
		$\bar{\nu}_e$	π^0										
		K^0	$\bar{K}^0$	974	0	0	0	0	+1		K_s^0 : $8,9 \cdot 10^{-11}$ K_L^0 : $5,2 \cdot 10^{-8}$	$K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ $K_s^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ $K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$ $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$	0,69 0,31 0,22 0,12 0,38 0,27
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$	$\eta^0 \rightarrow \gamma\gamma$ $\eta^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ $\eta^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ $\eta^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$	0,39 0,32 0,23 0,05
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
		η^0		1074	0	0	0	0	0	0	$7 \cdot 10^{-19}$		
Адроны	Протон	p	$\bar{p}$	1836,2	1/2	+1	0	+1	0	0	Стабилен	—	
	Нейтрон	n	$\bar{n}$	1838,7	1/2	0	0	+1	0	0	900	$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$	1
	Лямбда-гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183	1/2	0	0	+1	-1		$2,6 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$ $\Lambda^0 \rightarrow n \pi^0$	0,64 0,36
	Сигма-гипероны	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2328	1/2	+1	0	+1	-1		$8 \cdot 10^{-11}$	$\Sigma^+ \rightarrow n \pi^0$ $\Sigma^+ \rightarrow p \pi^+$	0,52 0,48
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2334	1/2	0	0	+1	-1		$5,8 \cdot 10^{-20}$	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 \gamma$	≈ 1
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343	1/2	-1	0	+1	-1		$1,5 \cdot 10^{-10}$	$\Sigma^- \rightarrow n \pi^-$	≈ 1
	Кси-гипероны	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2573	1/2	0	0	+1	-2		$2,9 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 \pi^0$	≈ 1
		Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2586	1/2	-1	0	+1	-2		$1,6 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 \pi^-$	≈ 1
	Омега-гипероны	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	3/2	-1	0	+1	-3		$8,2 \cdot 10^{-11}$	$\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 K^-$ $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 \pi^-$ $\Omega^- \rightarrow \Xi^- \pi^0$	0,68 0,23 0,08
		Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	3/2	-1	0	+1	-3		$8,2 \cdot 10^{-11}$		

1—название частицы, 2—символ частицы, 2—символ античастицы, 4—относительная масса, 5—спин, 6—относительный электрический заряд, 7—лептонный заряд, 8—барионный заряд, 9—странность, 10—время жизни в секундах, 11—наблюдаемые схемы распада частицы, 12—относительная вероятность схем распада

K^0 -мезоны называют K_S^0 -мезонами, а долгоживущие — K_L^0 -мезонами. Они имеют разные наборы схем распада.

Все элементарные частицы в таблице 26 разбиты на четыре группы. Первая группа состоит всего из одной частицы — *фотона*. Его можно определить как бозона, участвующего только в электромагнитном взаимодействии (помимо, разумеется, гравитационного взаимодействия, в котором участвуют все без исключения частицы).

Вторая группа — это *лептоны* (от греческого «лептос», означающего «мелкий, легкий»). В 1964 году было известно восемь лептонов: e^- , ν_e , μ^- , ν_μ плюс их античастицы (e^+ , $\bar{\nu}_e$, μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$). Лептоны можно определить как частицы, не участвующие в сильном взаимодействии. Все они являются фермионами.

В третью группу собраны бозоны, которые могут участвовать в сильном взаимодействии. Их общее название — *мезоны*. Большинство мезонов относятся к резонансам (бозонным резонансам).

Четвертая группа наиболее многочисленная. Это фермионы, способные участвовать в сильном взаимодействии. Их общее название — *барионы*. К ним относятся нуклоны (протон и нейтрон), гипероны, а также барионные резонансы и частицы, названные «очарованными барионами» (о них см. в теме 12).

Барионы и мезоны объединяют под общим названием «*адроны*» (от греческого «хадрос», означающего «массивный, тяжелый»). Заметим, что адроны участвуют не только в сильном взаимодействии, но также и в остальных фундаментальных взаимодействиях.

Фотоны, лептоны и адроны принципиально различаются по числу фундаментальных взаимодействий, в которых они могут участвовать:

Частицы (античастицы)		Взаимодействия			
		Гравитационнос	Электромагнитнос	Слабос	Сильнос
Фотоны		+	+	—	—
Лептоны	Нейтрино	+	—	+	—
	Электрически заряженные	+	+	+	—
Адроны		+	+	+	+

В гравитационном взаимодействии участвуют все частицы. В электромагнитном могут участвовать любые частицы, кроме нейтрино. В слабом взаимодействии могут участвовать лептоны и адроны и не участвуют фотоны. В сильном взаимодействии могут участвовать только адроны.

Обратим внимание читателя на то, что во всех приведенных в таблице 26 схемах распада частиц выполняется правило: *сумма масс продук-*

тов распада меньше массы исходной частицы. Это правило можно легко вывести из законов сохранения энергии и импульса. Предположим, что при распаде частицы с массой M рождаются частицы с массами m_1 и m_2 . Выберем в качестве системы отсчета систему, в которой исходная частица покоится. Тогда законы сохранения можно записать в виде:

$$\begin{aligned} Mc^2 &= \sqrt{(m_1 c^2)^2 + (p_1 c)^2} + \sqrt{(m_2 c^2)^2 + (p_2 c)^2} \quad (\text{для энергии}); \\ 0 &= \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 \quad (\text{для импульса}), \end{aligned} \quad (*)$$

где $\mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_2$ — импульсы рождающихся при распаде частиц. Из (*) сразу видно, что необходимым условием распада является выполнение неравенства $M > (m_1 + m_2)$.

Только что доказанное правило позволяет объяснить, *почему электрон стабилен*. Ведь он мог бы распасться лишь на частицы, сумма масс которых меньше массы электрона. Таких частиц три: γ , ν_e , ν_μ . Но поскольку все они *не имеют заряда*, распад электрона на них невозможен из-за закона сохранения электрического заряда, который должен выполняться во всех взаимопревращениях частиц. Электрон «вынужден» быть стабильной частицей просто потому, что ему «некому передать свой электрический заряд». (Он может избавиться от заряда и уничтожиться лишь при столкновении с другой частицей.)

Существенно, что при распаде величина импульса исходной частицы не играет роли. Как бы мы ни пытались ускорить, например, заряженный пион, все равно он может распасться лишь на такие частицы, у которых суммарная масса меньше массы пиона. Иное дело *столкновение двух частиц*. В этом случае, увеличивая импульс (а значит, и энергию) сталкивающихся частиц, можно реализовать процессы, в которых будут рождаться частицы с суммарной массой, большей суммы масс сталкивающихся частиц. Известный читателю пример: рождение электрон-позитронной пары при столкновении двух фотонов.

Вернемся еще раз к таблице 26 и обратим внимание на то, что при переходе от частицы к античастице массу, спин и время жизни надо оставить прежними, а знак относительного электрического заряда, лептонного заряда, барионного заряда и странности *следует заменить на противоположный*. Заметим, что надо изменить на противоположный также знак магнитного момента частицы (эта характеристика частицы в таблицу не вошла).

Относительный электрический заряд — это отношение электрического заряда элементарной частицы к электрическому заряду протона. О

том, что такое странность частицы, мы говорили в предыдущем параграфе. Остается пояснить, что понимается под лептонным и барионным зарядами.

Из многочисленных наблюдений установлено, что во всех взаимопревращениях элементарных частиц разность чисел исходных лептонов и антилептонов оказывается равной разности чисел конечных лептонов и антилептонов. Если приписать каждому лептону квантовое число (*лептонный заряд*) $L = +1$, антилептору $L = -1$, а всем остальным частицам $L = 0$, то отмеченный выше факт можно рассматривать как закон сохранения лептонного заряда: *в любом взаимопревращении сумма лептонных зарядов частиц не меняется.*

Установлено также, что во всех взаимопревращениях частиц разность чисел исходных барионов и антибарионов оказывается равной разности чисел конечных барионов и антибарионов. Приписывая каждому бариону квантовое число (*барионный заряд*) $B = +1$, антибариону $B = -1$, а всем остальным частицам $B = 0$, рассматривают упомянутый факт как закон сохранения барионного заряда: *в любом взаимопревращении сумма барионных зарядов частиц не меняется.*

Закон сохранения барионного заряда объясняет *стабильность протона*. У протона $B = 1$, а у всех остальных частиц с массой, меньшей массы протона $B = 0$. Одиночный протон «вынужден» быть стабильным по той причине, что ему «некому передать свой барионный заряд».

Читатель, при желании, может самостоятельно убедиться, что во всех схемах распада, приведенных в таблице 26, равно как и в процессах (17), (18), (19) — везде выполняются как закон сохранения лептонного заряда, так и закон сохранения барионного заряда. Отметим, что эти законы в значительной мере *сокращают* число допустимых взаимопревращений элементарных частиц.



ПОИСКИ ПЕРВОНАЧАЛ МАТЕРИИ: КВАРКОВАЯ МОДЕЛЬ АДРОНОВ

Парадоксальные свойства кварков не имеют прецедента в богатой парадоксами истории физики.

Л.Б. Окунь

Только переход к кварковому уровню строения материи позволил выявить единство в описании всех фундаментальных сил природы.

Я.Б. Зельдович

12.1 ОТКРЫТИЕ КВАРКОВОЙ СТРУКТУРЫ АДРОНОВ

К началу 60-х годов прошлого столетия в физике элементарных частиц сложилась любопытная ситуация. К этому времени ученые располагали четырьмя лептонами (e^- , ν_e , μ^- , ν_μ) и подозрительно огромным количеством адронов, уже давно перевалившим за две сотни. Обилие адронов невольно наталкивало на предположение, что эти частицы не являются элементарными, а представляют собой структуры, образован-

ные относительно малым числом неких «более элементарных» частиц. И вот, в 1964 году два американских физика — *Мюррей Гелл-Манн* и *Джордж Цвейг* (род. 1937 г.) — независимо друг от друга выдвинули гипотезу, согласно которой все адроны состоят всего из трех частиц (плюс три античастицы). Гелл-Манн назвал гипотетические частицы *кварками*, а Цвейг — *тузами*. Термин «туз» не прижился, а с «кварками» ныне знакомы хотя бы понаслышке даже далекие от физики люди.

Происхождение термина «кварк» никакого отношения к науке не имеет. В романе английского писателя Джойса «Поминки по Финнегану» главный герой вообразил себя легендарным средневековым королем Марком, у которого племянник Тристан похитил жену Изольду. Король Марк отправляется на корабле в погоню за Изольдой, а над кораблем кружатся странные чайки (а может быть, привидения) и кричат: «Три кварка мистеру Марку! Три кварка! Три кварка!» Вот Гелл-Манн и предложил дать трем гипотетическим частицам (которые, может быть, не более, чем плод воображения!) это таинственное название — *кварки*.

Оказалось, однако, что кварки — отнюдь не плод воображения, а частицы, из которых действительно состоят все адроны. Гипотеза Гелл-Манна—Цвейга оказалась исключительно плодотворной. Так что 1964-й год можно считать для нашего понимания первоначал материи столь же переломным, как и 1932-й год, когда были открыты нейтрон и позитрон.

Вначале рассматривались три типа кварков (их обозначения: u , d , s) и, соответственно, три типа антикварков ($\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$). Спин кварков и антикварков равен $1/2$; эти частицы являются фермионами. На рисунке 1 в таблице 27 приведены некоторые характеристики кварков и антикварков — относительный электрический заряд Q , странность S , барионный заряд B . Лептонный заряд кварков равен, естественно, нулю. Как можно видеть из рисунка, кварк s является «носителем странности» (этим объясняется его обозначение — начальная буква английского слова *strange*, означающего «странный»). Обратим внимание на то, что кварки обладают не целочисленным, а *дробным* электрическим зарядом, равным одной или двум третям заряда электрона.

На рисунке 2 в таблице 27 показана *кварковая структура* адронов и антиадронов. Здесь не дана структура истинно нейтральных адронов (которые сами себе античастицы): π^0 и ν^0 . Нейтральному пиону сопоставляют две взаимопревращающиеся кварковые структуры: $u\bar{u}$ и $d\bar{d}$. Кварки u и $\bar{u}$, аннигилируя, превращаются в кварки d и $\bar{d}$. Можно сказать, что — π^0 -мезон часть времени проводит в состоянии $u\bar{u}$, а

часть времени — в состоянии $d\bar{d}$. Эта-нуль-мезону сопоставляют три взаимопревращающиеся кварковые структуры: $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ и $s\bar{s}$.

Нетрудно весьма грубо оценить массу кварков разного типа, исходя из известных масс тех или иных барионов. Массы протона и нейтрона приблизительно одинаковы и составляют около $1800 m_e$. Поскольку масса нуклона практически не меняется при замене u на d , то можно принять, что массы u -кварка и d -кварка приблизительно равны $600 m_e$ каждая. Поскольку масса Λ^0 -гиперона примерно $2200 m_e$, то можно заключить, что s -кварк имеет массу порядка $1000 m_e$. Тогда кси-гипероны, имеющие структуру uus или dss , должны обладать массами, равными $600 + 600 + 1000 = 2600 m_e$, а омега-гиперон (структура sss) должен обладать массой около $3000 m_e$. Все эти числа неплохо согласуются с экспериментальными данными.

Кварковая структура π^+ -мезона позволяет весьма просто представить фейнмановскую диаграмму его распада ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) — см. рисунок 3 в таблице 27. Сравните эту диаграмму с диаграммой на рисунке 6 в таблице 24.

Распад нейтрона ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) должен с учетом кварковой структуры нейтрона интерпретироваться как *превращение одного из d -кварков нейтрона в u -кварк, электрон и электронное антинейтрино*:

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (1)$$

Соответствующая кварковая диаграмма (фейнмановская диаграмма с учетом кварковой структуры адронов) представлена на рисунке 4 в таблице 27. Сравните ее с диаграммой на рисунке 5 в таблице 2 и обратите внимание на то, что в реакции (1) выполняются законы сохранения электрического, лептонного, барионного зарядов.

На рисунке 5 в той же таблице дана кварковая диаграмма для процесса, в котором при столкновении электронного нейтрино с нейтроном рождаются протон и электрон ($\nu_e + n \rightarrow p + e^-$). В этом процессе происходит превращение:

$$\nu_e + d \rightarrow u + e^-. \quad (2)$$

Приведенные на рисунках 4 и 5 диаграммы наглядно демонстрируют общее правило:

|| *в процессах, обусловленных слабым взаимодействием происходят взаимопревращения лептонов и кварков; кварки выступают в качестве представителей адронов в таких процессах.*

На диаграммах на рисунках 4 и 5 видно, что один из кварков адрона испускает промежуточный векторный бозон W^- , который затем взаи-

Таблица 27. Открытие кварковой структуры адронов

	Q	S	B
u	+2/3	0	+1/3
d	-1/3	0	+1/3
s	-1/3	-1	+1/3
$\bar{u}$	-2/3	0	+1/3
$\bar{d}$	+1/3	0	-1/3
$\bar{s}$	+1/3	+1	-1/3

Рис.1

Кварковая структура адронов-частиц										
π^+	K^+	K^0	p	n	Λ^0	Σ^+	Σ^0	Σ^-	Ξ^0	Ξ^-
$u\bar{d}$	$u\bar{s}$	$d\bar{s}$	uud	udd	uds	uus	uds	dds	uss	dss

Кварковая структура адронов-античастиц										
π^-	K^-	$\bar{K}^0$	$\bar{p}$	$\bar{n}$	$\bar{\Lambda}^0$	$\bar{\Sigma}^+$	$\bar{\Sigma}^0$	$\bar{\Sigma}^-$	$\bar{\Xi}^0$	$\bar{\Xi}^-$
$\bar{u}d$	$\bar{u}s$	$\bar{d}s$	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	$\bar{u}\bar{d}\bar{s}$	$\bar{u}\bar{u}\bar{s}$	$\bar{u}\bar{d}\bar{s}$	$\bar{d}\bar{d}\bar{s}$	$\bar{u}\bar{s}\bar{s}$	$\bar{d}\bar{s}\bar{s}$

Рис.2

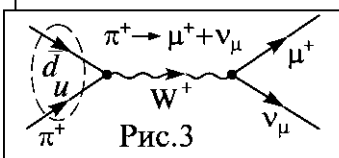
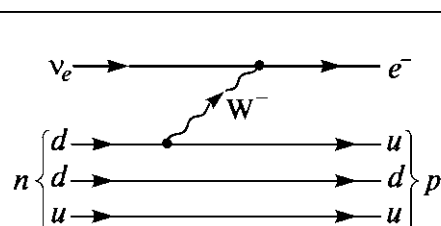
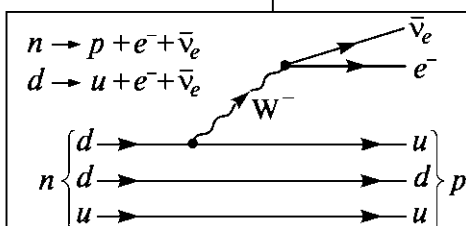
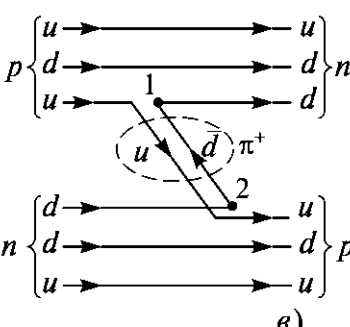
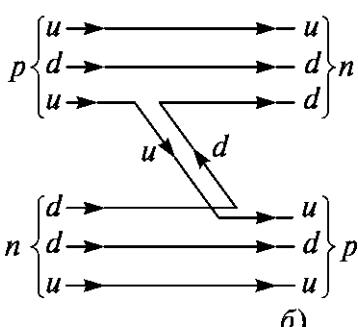
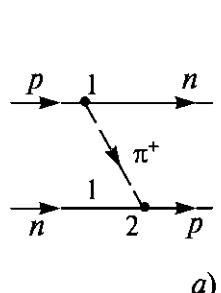
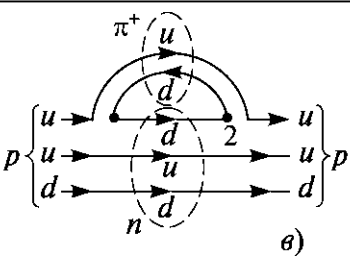
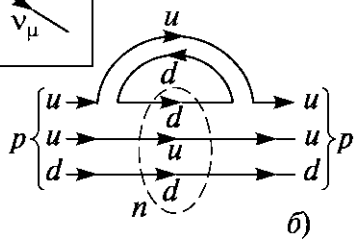
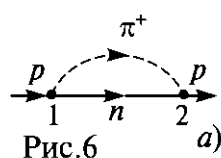


Рис.4

Рис.5



модействует с парой лептонов. При этом тип кварка меняется: d -кварк превращается в u -кварк. В настоящее время принято говорить не о типе кварка, а об *аромате* кварка (характеристика кварка, называемая его «ароматом», разумеется, не имеет никакого отношения к запаху). Итак,

|| *в процессах, обусловленных слабым взаимодействием, может измениться аромат кварка.*

Забегая вперед, заметим, что

|| *в процессах, обусловленных сильным или электромагнитным взаимодействиями, аромат кварка всегда сохраняется (а значит, сохраняется его электрический заряд и странность).*

В § 11.8 мы говорили о пионах как переносчиках сильного взаимодействия, связывающего нуклоны в ядре атома, а также о существовании «мезонной шубы» вокруг одиночного нуклона. Теперь, когда нуклоны и пионы представляются кварковыми структурами, необходимо внести определенные уточнения в диаграммы, изображавшиеся на рисунках 1–3 в таблице 25. Представленный на рисунке 3 в таблице 25 процесс рождения и последующего поглощения нуклоном виртуального π^+ -мезона может быть изображен кварковой диаграммой на рисунках 6б и 6в в таблице 27. Эти два рисунка эквивалентны, поскольку движение d -кварка «вспять во времени» означает естественное (во времени) движение антикварка $\bar{d}$. На рисунке 6в видно, что рождению виртуального π^+ -мезона соответствует в кварковой модели рождение в вершине 1 виртуальной пары $d - \bar{d}$, а поглощению виртуального π^+ -мезона соответствует аннигиляция указанной пары в вершине 2. Аналогичным образом на рисунках 7 рассмотрен процесс обмена π^+ -мезоном между двумя нуклонами.

Нужно отметить, что гипотеза о кварковой структуре адронов сразу же столкнулась с серьезной проблемой. Гипероны Λ^0 и Σ^0 имеют одинаковую кварковую структуру; есть структуры с двумя одинаковыми кварками, а гиперон Ω^- состоит из трех одинаковых кварков. Кварки являются фермионами, поэтому согласно принципу запрета Паули в одном состоянии не может находиться более одного кварка данного аромата. Значит, с каждым кварком нужно связывать несколько различных состояний. Надо учитывать, в частности, возможность двух спиновых состояний кварка (две возможных ориентации спина кварка — «вверх» и «вниз»). Однако в случае Ω^- -гиперона этот учет не спасает положение: спин гиперона равен $3/2$ и, значит, все три s -кварка находятся здесь в одном и том же состоянии. Ясно, что эти три кварка должны различаться по какому-то *дополнительному* свойству. Дополнительную характеристику кварка физики-теоретики назвали условно «цветом».

12.2 ПОЯВЛЕНИЕ У КВАРКОВ «ЦВЕТА»

Чтобы согласовать кварковую модель с принципом Паули, труппа российских ученых во главе с академиком *Николаем Николаевичем Боголюбовым* (1909–1992) предложили считать, что кварк каждого аромата может находиться в одном из трех состояний, названных «цветом». У каждого аромата есть три возможных цвета. Условно рассматривают красный, синий и желтый «цвета» у кварков и антикрасный (зеленый), антисиний (оранжевый) и антижелтый (фиолетовый) «цвета» у антикварков. Конечно, понятию цвета кварка или антикварка не надо придавать буквального смысла. Используется лишь *оптическая аналогия*: смешение красного, синего и желтого цветов (равно как антицветов: зеленого, оранжевого и фиолетового) дает, как известно, бесцветную, т. е. белую композицию. Суть оптической аналогии заключается в том, что *адроны и антиадроны должны быть бесцветными объектами*. Это означает, что в любом барионе один из кварков должен быть красным, другой синим, третий желтым, т. е. необходимо «перемешивание трех основных цветов». Соответственно в любом антибарионе один из кварков должен быть зеленым (антикрасным), один оранжевым (антисиним), один фиолетовым (антижелтым). В любом мезоне и антимезоне должны комбинироваться цвет и соответствующий ему антицвет: или красный у кварка и зеленый у антикварка, или синий у кварка и оранжевый у антикварка, или желтый у кварка и фиолетовый у антикварка. «Бесцветность» адронов и антиадронов — принципиальное свойство; в теории кварков это свойство называют правилом *невыветания цвета*.

На рисунке 1 в таблице 28 в верхнем прямоугольнике дан обязательный набор трех цветовых состояний, который должен быть представлен в любом барионе, а в нижнем прямоугольнике — набор трех цветовых состояний для любого антибариона. Пунктиром и штриховкой выделены три возможных набора из двух цветовых состояний; любой мезон (антимезон) должен быть представлен каким-либо одним из этих трех парных наборов.

Итак, кварки различаются не только ароматом, но и цветом. Рассмотрим для примера кварковую структуру с тремя разными ароматами: *uds*. С учетом трех цветов эта система может иметь $3 \times 3 \times 3 = 27$ состояний. Однако в виде бариона могут быть реализованы не все эти 27 состояний, а лишь 6 взаимно «обесцвеченных» состояний:

$$\begin{array}{lll} u_c d_c s_{\bar{c}}; & u_c d_{\bar{c}} s_{\bar{c}}; & u_{\bar{c}} d_{\bar{c}} s_c; \\ u_{\bar{c}} d_{\bar{c}} s_c; & u_{\bar{c}} d_c s_{\bar{c}}; & u_c d_c s_{\bar{c}}. \end{array}$$

(здесь индексами k , s , j помечены, соответственно, красный, синий и желтый ароматы). Какое-то одно из этих шести состояний может быть связано с Λ^0 -гипероном, а какое-то — с Σ^0 -гипероном.

Правило невылетания цвета объясняет, почему не могут быть экспериментально обнаружены отдельные кварки (а также структуры, например, из двух или четырех кварков) — *это были бы «цветные» объекты*. Недаром настойчивые многолетние поиски свободных кварков оказались безуспешными: «расщепить» адроны на составляющие их кварки так и не удалось. Неудивительно, что некоторое время сохранялось сомнение, не является ли гипотеза кварков всего лишь остроумным математическим приемом. К середине 70-х годов ученые перестали сомневаться в том, что кварки внутри адронов реально существуют. Что убедило их? Прежде всего тот факт, что три кварка (плюс три антикварка) позволили сконструировать все адроны и антиадроны, открытые до 1974-го года. Примечательно, что такое конструирование не порождало лишних объектов — все полученные «конструкции» были, в конечном счете, обнаружены экспериментально (на ускорителях заряженных частиц). Следует подчеркнуть, что кварковая модель позволила правильно рассчитать различные характеристики адронов, вероятности их взаимопревращений. В 1969 году опыты по рассеянию электронов высоких энергий на протонах позволили в буквальном смысле *нащупать кварки внутри протона*. Теоретический анализ этих опытов показал, что внутри протона электроны рассеиваются на центрах с электрическими зарядами $+2/3$ и $-1/3$ и спином $1/2$. Реальность кварковой гипотезы окончательно подтвердило ее дальнейшее развитие, связанное с открытием новых типов элементарных частиц, получивших экзотическое название «очарованные частицы». Это произошло в середине 70-х годов. Об открытии очарованных адронов мы поговорим позднее, в § 12.4.

Итак, *следует полагать существование кварков внутри адронов*. Однако вырвать оттуда кварки принципиально нельзя; в природе могут наблюдаться в свободном виде только «бесцветные» микрообъекты. В связи с этим используют термин «конфайнмент», который в переводе с английского означает «тюремное заключение, пленение». При помощи данного звучного и выразительного термина подчеркивают принципиальную важность правила невылетания цвета.

12.3 ГЛЮОНЫ КАК ПЕРЕНОСЧИКИ СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. РОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ ХРОМОДИНАМИКИ

Конечно, правило невылетания цвета (конфайнмент) объясняет, почему нельзя обнаружить экспериментально отдельные кварки. Однако

чем же объясняется само это правило? *Конфайнмент объясняется наличием взаимодействия между кварками в адронах.* Это как раз и есть *сильное взаимодействие*, одно из четырех фундаментальных взаимодействий. Переносчиками взаимодействия являются бозоны с нулевой массой покоя и спином 1, получившие название глюонов (от английского glue, означающего «клей»). Образно говоря, глюоны как бы «склеивают» кварки и антикварки в адроны и антиадроны.

Оказалось, что введенная для кварков цветовая характеристика имеет гораздо более глубокий смысл, нежели просто признак, позволяющий различать состояния того или иного аромата. *Цвет кварка — это некий «заряд»* (не следует путать его с электрическим зарядом), *которым обладает кварк.* Благодаря наличию такого заряда кварк создает вокруг себя своеобразное поле; его можно назвать *цветовым полем*. Оно подобно электромагнитному полю, создаваемому электрическим зарядом, хотя и существенно отличается от него. И прежде всего тем, что является короткодействующим. *Квантами цветового поля как раз и служат глюоны* (подобно тому, как квантами электромагнитного поля служат фотоны). Однако если сами фотоны электрического заряда не несут, то *глюоны обладают цветовым зарядом.* Можно говорить, например, о красно-оранжевом глюоне, красно-фиолетовом глюоне, желто-оранжевом глюоне и т. д. Как показывает теория, существуют восемь типов глюонов, различающихся цветовым зарядом.

На рисунках 2 в таблице 28 показаны фейнмановские диаграммы для четырех элементарных актов сильного взаимодействия глюонов с кварками; здесь q — кварки, g — глюоны. На рисунке 2а *глюон поглощается кварком.* При этом аромат кварка не меняется, но меняется его цветное состояние — в зависимости от типа поглощенного глюона. На рисунке 2б *глюон испускается кварком;* аромат кварка сохраняется, цвет изменяется. Если, например, красный u -кварк испускает красно-оранжевый (иначе говоря, красно-антисиний) глюон, то он превращается в синий u -кварк. Можно сказать, что глюон забрал у кварка красный заряд и взамен этого дал ему синий заряд. Если затем красно-антисиний глюон будет поглощен, скажем, синим d -кварком, то он передаст тому красный заряд, забрав синий; при этом d -кварк превратится из синего в красный.

На рисунке 2в глюон рождает пару кварк–антикварк. При этом аромат кварка соответствует аромату антикварка: рождаются пары либо u и $\bar{u}$, либо d и $\bar{d}$, либо s и $\bar{s}$. Цвета рожденных глюоном кварка и антикварка определяются цветовым зарядом глюона. На рисунке 2г *пара кварк–антикварк аннигилирует*, превращаясь в глюон с соответствующим

Таблица 28. Кварки и глюоны

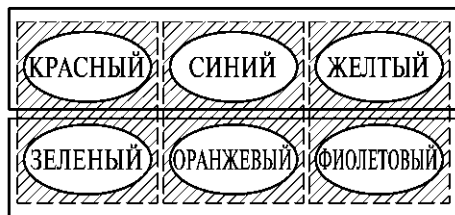


Рис.1

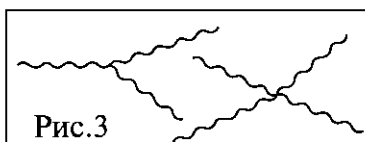


Рис.3

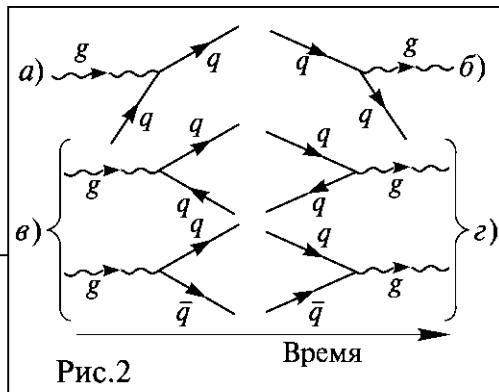


Рис.2

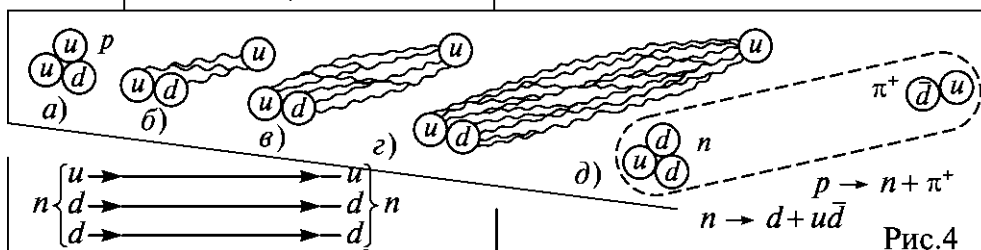


Рис.4

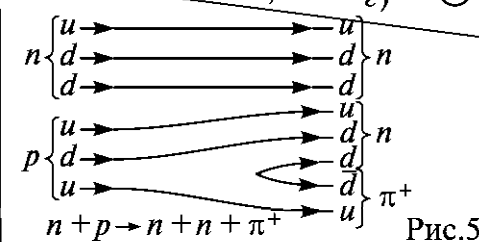


Рис.5

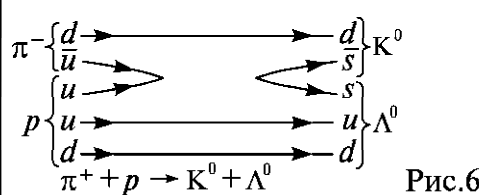


Рис.6

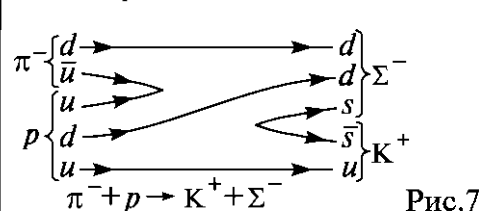


Рис.7

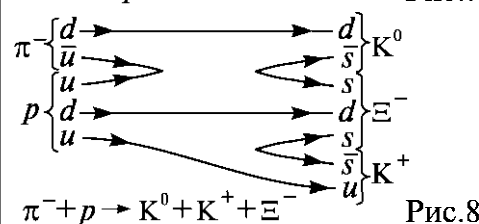


Рис.8

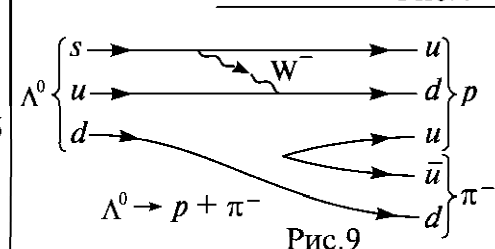


Рис.9

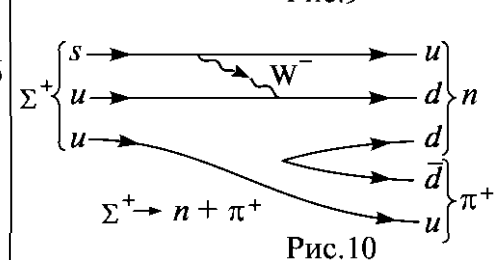


Рис.10

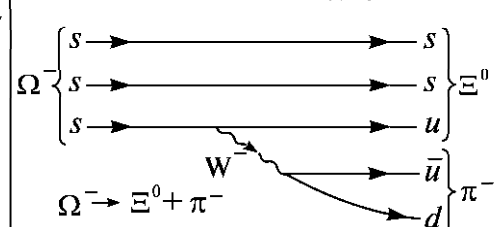


Рис.11

шим цветовым зарядом. На рисунках 2в и 2г приведены по две диаграммы. Диаграммы, объединенные скобкой, очевидно, эквивалентны, поскольку движение кварка «вспять во времени» означает естественное (во времени) движение антикварка.

Итак, кварки внутри адронов *беспрестанно меняют цвет* (т. е. цветовые заряды), *обмениваясь глюонами*. Изменения цвета кварков происходят таким образом, что адроны все время остаются «бесцветными». То же относится и к антиадронам. Можно сказать, что цвет (цветовой заряд, определяющий цветовое состояние) — это главная характеристика кварка с точки зрения сильного взаимодействия. Недаром теорию сильного взаимодействия глюонов и кварков, интенсивно развивающуюся в течение последних трех десятилетий, называли *квантовой хромодинамикой* (по-гречески «хромос» означает «цвет»).

Цветовые заряды кварков создают цветовое поле, квантами которого являются глюоны. Существенно, что эти кванты *сами* обладают цветовыми зарядами. Поэтому в отличие от квантов электромагнитного поля (фотонов) *глюоны весьма активно взаимодействуют*, взаимопревращаясь друг в друга и обмениваясь при этом цветовыми зарядами. Так, например, желто-оранжевый глюон, встретившись с красно-фиолетовым глюоном, превращается в красно-оранжевый глюон. Элементарные акты взаимопревращений глюонов изображены в виде диаграмм на рисунке 3 в таблице 28 (волнистые линии — глюоны).

Итак, *глюоны могут рождать друг друга*, т. е. могут сами создавать цветовое поле. Это приводит к интересному эффекту: *с увеличением расстояния между кварками взаимодействие между ними не убывает, а напротив, возрастает*. Именно этим объясняется конфайнмент как самих глюонов, так и кварков. Всякая попытка выбить кварк из адрона приводит к тому, что энергия, затрачиваемая на выбивание, идет сначала на рождение новых глюонов и в конечном счете приводит к образованию мезона. Это показано схематически на рисунках 4 в таблице 28: попытка выбить *и*-кварк из протона приводит к образованию двух новых адронов — нейтрона и положительно заряженного пиона.

Если полстолетия назад физики полагали, что сильное взаимодействие обусловлено обменом пионами, происходящим между барионами, то теперь представление о сильном взаимодействии существенно углубилось. Это взаимодействие обусловлено обменом глюонами (и значит, цветовыми зарядами), происходящим между кварками, входящими в состав адронов и, в частности, тех же пионов. Как заметил Шелдон Глэшоу,

«взаимодействие бесцветных адронов — не более, чем слабый остаток от основного взаимодействия цветных кварков. Точно так же как межмолекулярные

силы между нейтральными молекулами — только слабый след электромагнитных сил, которые притягивают электроны к ядру; сильные взаимодействия между адронами — лишь слабый след сил, действующих внутри отдельного адрона».

В заключение предлагаем читателю внимательно рассмотреть несколько кварковых диаграмм. На рисунках 5–8 приведены диаграммы для следующих процессов, обусловленных сильным взаимодействием:

$$\begin{aligned}n + p &\rightarrow n + n + \pi^+; \\ \pi^- + p &\rightarrow K^0 + \Lambda^0; \\ \pi^- + p &\rightarrow K^+ + \Sigma^-; \\ \pi^- + p &\rightarrow K^0 + K^+ + \Xi^-.\end{aligned}$$

Легко видеть, что во всех этих процессах аромат кварков не меняется, а происходит перегруппировка кварков, дополненная актами аннигиляции и рождения пар кварк–антикварк. Взаимодействие кварков и глюонов проявляется не только в упомянутых актах аннигиляции и рождения пар, но также в изменениях цвета (цветовых зарядов) кварков.

На рисунках 9–11 приведены кварковые диаграммы для распадов гиперонов:

$$\begin{aligned}\Lambda^0 &\rightarrow p + \pi^-; \\ \Sigma^+ &\rightarrow n + \pi^+; \\ \Omega^- &\rightarrow \Xi^0 + \pi^-.\end{aligned}$$

В этих процессах происходит рождение и поглощение виртуального бозона Ω^- , обусловленное слабым взаимодействием и приводящее к изменению аромата кварка. Наблюдаются также акты рождения глюонами пар кварк–антикварк, обусловленные сильным взаимодействием.

12.4 ОТКРЫТИЕ «ОЧАРОВАННЫХ ЧАСТИЦ» И «ПРЕЛЕСТНЫХ ЧАСТИЦ»

В 1974 году был открыт еще один истинно нейтральный мезон; он характеризовался массой $6060 m_e$, спином 1 и временем жизни около 10^{-20} с. Его открыли независимо друг от друга две группы американских физиков — группа *Сэмюэла Тинга* (род. 1936 г.) и группа *Бертона Рихтера* (род. 1931 г.). Первая группа дала новой частице обозначение J , а вторая — ψ . В итоге новый мезон получил двойное название — *джейпси-мезон* (J/ψ). В 1976 году Тинг и Рихтер были удостоены Нобелевской премии за открытие J/ψ -мезона.

Чем объяснить столь большое внимание к новому мезону? Прежде всего ученых удивило его время жизни — оно оказалось в тысячу раз больше, чем следовало из теории (с учетом столь большой массы). После открытия в 1964 году Ω^- -гиперона минуло десять лет, в течение которых физики открывали на ускорителях лишь короткоживущие резонансы. И вот открыта новая «долгоживущая» частица. Она оказалась весьма интересной, поскольку для объяснения ее свойств потребовалось ввести новую физическую величину, сохраняющуюся только в слабом взаимодействии. Не мудрствуя лукаво, физики назвали эту величину «очарованием» (charm). Пришлось постулировать существование *нового кварка* — *носителя очарования*. Его назвали *c-кварком*. Ему приписали очарование $C = +1$, а остальным кваркам (u , d , s) — очарование $C = 0$. Электрический заряд *c-кварка* равен $+2/3$.

Кварковая структура J/ψ -мезона есть $c\bar{c}$. Ее называют *чармонием* и рассматривают как атомоподобную систему, похожую на позитроний (систему из электрона и позитрона, движущуюся вокруг общего центра масс). Как и всякий атом, чармоний имеет систему уровней энергии; правда, расстояния между этими уровнями в миллиард раз больше расстояний между энергетическими уровнями в обычном атоме. Каждому уровню чармония отвечает некая частица, ее масса определяется формулой Эйнштейна $E = mc^2$. Джей-пси-мезон отвечает одному из уровней чармония. Вскоре были открыты мезонные резонансы, отвечающие другим уровням. Некоторые из них представлены на рисунке 5 в таблице 30.

Очарования кварка c и антикварка $\bar{c}$ имеют противоположные знаки; поэтому результирующее очарование структуры $c\bar{c}$ (т. е. чармония) равно нулю. Как говорят, структура ее обладает *скрытым очарованием*. Мезоны с *явным очарованием* были открыты в 1976 году: дэ-плюс-мезон (D^+), дэ-нуль-мезон (D^0) и эф-плюс-мезон (F^+). Они имеют кварковые структуры, соответственно, $c\bar{d}$, $c\bar{u}$, $c\bar{s}$. Их времена жизни превышают 10^{-13} с. Были открыты также очарованные гипероны с кварковыми структурами udc и usc — см. рисунок 1 в таблице 29.

В 1977 году был открыт еще один «долгоживущий» истинно нейтральный мезон; его назвали ипсилон-мезоном (Υ). Масса нового мезона оказалась в десять раз больше массы протона (она составила $18\,500\,m_e$), время жизни $4 \cdot 10^{-20}$ с. Для объяснения свойств новой частицы ввели очередную новую физическую величину, названную «*прелестью*» (beauty). Пришлось постулировать существование очередного нового кварка — *носителя прелести*, названного *b-кварком*. Ему приписали прелесть $b = +1$, а всем остальным кваркам (u , d , s , c) — прелесть $b = 0$. Электрический заряд *b-кварка* равен $-1/3$.

Ипсилон-мезон имеет кварковую структуру $b\bar{b}$ — он является мезоном со *скрытой прелестью*. Вскоре были открыты мезоны с *явной прелестью* (с кварковыми структурами $u\bar{b}$ и $d\bar{b}$) — см. рисунок 2 в таблице 29.

После 1977 года открытия новых как очарованных, так и прелестных адронов, естественно, продолжались, и список «долгоживущих» адронов постепенно увеличивался.

12.5 КВАРК-ЛЕПТОННАЯ СИММЕТРИЯ; ТРИ ПОКОЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФЕРМИОНОВ

Фактически сразу после появления кварковой гипотезы возникло подозрение, что кварки вместе с лептонами как раз и исчерпывают набор *фундаментальных фермионов* (фермионов, которые можно рассматривать в качестве истинно элементарных частиц, не обладающих какой-либо внутренней структурой). В 1964 году были известны четыре лептона (e^- , ν_e , μ^- , ν_μ) и три кварка (u , d , s). Физики-теоретики, будучи большими любителями и ценителями принципа симметрии, уже тогда высказывали предположение, что, по-видимому, должен существовать четвертый кварк. Спустя десять лет это предположение оправдалось — четвертый кварк (c -кварк) оказался действительно необходимым, были открыты адроны, содержащие в себе этот кварк.

Ситуация 4×4 (4 лептона и 4 кварка, если не считать античастицы) представлялась вполне «разумной». Однако в 1975 году Мартин Перл нарушил наступившее успокоение, открыв экспериментально (в опытах на встречных электрон-позитронных пучках на ускорителе в Станфорде) сверхтяжелый лептон с массой $3490 m_e$ (τ -лептон, или таон). Симметричная ситуация 4×4 была тем самым разрушена. Вместе с обнаружением τ -лептона пришлось постулировать и существование таонного нейтрино (ν_τ). Теперь число лептонов увеличилось до шести. Естественно, что физики принялись за поиск двух «недостающих» кварков.

Пятого кварка (b -кварка) долго искать не пришлось. Его существование было экспериментально подтверждено в 1977 году. А вот существование шестого кварка удалось подтвердить лишь в 1995 году. Его назвали t -кварком — носителем еще одной физической величины, t , получившей экстравагантное название «истина» (truth). Масса t -кварка была оценена в $340\,000 m_e$ (в 180 раз тяжелее протона!). Чтобы убедиться в существовании этого кварка, ученые воспользовались сверхмощным ускорителем «Тэватроном» (Лаборатория имени Энрико Ферми в

Чикаго), в котором сталкивались встречные пучки протонов и антипротонов, имевших энергию 900 ГэВ. Кварк t является *носителем истины* (у него $t = +1$), тогда как все остальные кварки носителями истины не являются (у них $t = 0$). Электрический заряд t -кварка равен $+2/3$.

На рисунке 3 в таблице 29 собраны характеристики шести кварков (u, d, s, c, b, t) и шести лептонов ($e^-, \nu_e, \mu^-, \nu_\mu, \tau^-, \nu_\tau$). Заметим, что вопрос о массе нейтрино до сих пор остается открытым; на рисунке указана верхняя граница масс различных нейтрино, установленная к настоящему времени.

Итак, налицо *симметричная* ситуация — шесть кварков и шесть лептонов (плюс столько же античастиц). Примем также во внимание упоминавшееся в § 12.1 правило (*), согласно которому именно кварки выступают представителями адронов в процессах, обусловленных слабым взаимодействием. Все это позволяет говорить о существовании пока еще не объясненной, но определенно просматривающейся *кварк-лептонной симметрии*.

Шесть лептонов и шесть кварков принято разбивать на три группы — на так называемые *поколения фундаментальных фермионов* (см. рисунок 4 в таблице 29). Самые легкие частицы образуют первое поколение. Во втором поколении заряженные частицы значительно тяжелее, чем в первом. В третьем поколении заряженные частицы значительно тяжелее, чем во втором.

Фермионы *первого поколения* плюс фотоны — это, по сути дела, и есть та материя, из которой состоит современная Вселенная. Из кварков u и d построены нуклоны, а значит, атомные ядра; электроны образуют атомные оболочки. Электронные нейтрино необходимы для осуществления ядерного синтеза в недрах звезд и, в частности, нашего Солнца. Фотоны — это свет, электромагнитное излучение, переносчики многообразных процессов, обусловленных электромагнитным взаимодействием.

А какова роль фундаментальных фермионов второго и третьего поколений? Вот что пишет о роли фермионов этих поколений известный российский физик-теоретик академик *Лев Борисович Окунь* (род. 1929 г.):

«На первый взгляд, мир без них был бы ничуть не хуже. Эти частицы напоминают черновые наброски, которые Творец выбросил, как неудачные, а мы с помощью нашей изощренной техники откопали их в его мусорной корзине. Но сейчас мы начинаем понимать, что фермионы второго и третьего поколений играли важную роль в ранней Вселенной, в первые мгновения так называемого Большого взрыва... Важную роль эти поколения, по-видимому, играют также и в том, что частицы первого поколения имеют именно те массы, которые они имеют. А от

Таблица 29. Новые частицы. Кварк-лептонная симметрия. Некоторые очарованные частицы

Некоторые очарованные частицы

		Масса, m_e	Q	B	L	S	C	Время жизни, с	Кварковая структура
Мезоны	J/ψ	6060	0	0	0	0	0	10^{-20}	$c\bar{c}$
	D ⁺	3660	+1	0	0	0	+1	$8 \cdot 10^{-13}$	$c\bar{d}$
	D ⁰	3650	0	0	0	0	+1	$4 \cdot 10^{-13}$	$c\bar{u}$
	F ⁺	3855	+1	0	0	+1	+1	$3 \cdot 10^{-13}$	$c\bar{s}$
Гипероны	Λ _c ⁺	4450	+1	+1	0	0	+1	$\sim 10^{-13}$	udc
	F ⁺	4800	+1	+1	0	-1	+1	$\sim 10^{-13}$	usc

Рис.1

Некоторые очарованные частицы

		Масса, m_e	Q	B	L	S	b	Время жизни, с	Кварковая структура
Υ	Υ	18500	0	0	0	0	0	$4 \cdot 10^{-20}$	$b\bar{b}$
	B ⁺	10300	+1	0	0	0	+1	$\sim 10^{-12}$	$u\bar{b}$
	B ⁰	10300	0	0	0	0	+1	$\sim 10^{-12}$	$d\bar{b}$

Рис.2

Фундаментальные фермионы

		Масса, m_e	Q	B	L	S	C	b	t
Кварки	u	600	+2/3	+1/3	0	0	0	0	0
	d	600	-1/3	+1/3	0	0	0	0	0
	s	1000	-1/3	+1/3	0	-1	0	0	0
	c	3200	+2/3	+1/3	0	0	+1	0	0
	b	10000	-1/3	+1/3	0	0	0	+1	0
	t	340000	+2/3	+1/3	0	0	0	0	+1
Лептоны	e ⁻	1	-1	0	+1	0	0	0	0
	ν _e	<0,0001	0	0	+1	0	0	0	0
	μ ⁻	207	-1	0	+1	0	0	0	0
	ν _μ	<1	0	0	+1	0	0	0	0
	τ ⁻	207	-1	0	+1	0	0	0	0
	ν _τ	<100	0	0	+1	0	0	0	0

Поколения фундаментальных фермионов

Поколения			Q
I	I	I	
ν _e	ν _μ	ν _τ	0
e ⁻	μ ⁻	τ ⁻	0
u	c	t	+2/3
d	s	b	-1/3

Рис.4

Q – электрический заряд;
 B – барионный заряд;
 L – лептонный заряд;
 S – странность;
 C – очарование;
 b – прелесть;
 t – истина;

Рис.3

соотношения между массами u^- , d -кварков и электрона зависит само наше существование. Ведь разность масс нейтрона и протона обусловлена в основном разностью масс u и d -кварков. А если бы выполнялось неравенство

$$m_p - m_n + m_e > 0,$$

то водород был бы нестабилен. Итак, мы начинаем догадываться, что высшие поколения не столь уж маловажны. Выяснение их глубинной роли, как, впрочем, и природы самой кварк-лептонной симметрии, — одна из важнейших задач физики».

12.6 ТРИ ЭТАПА В ПОЗНАНИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА — ТРИ СПЕКТРОСКОПИИ

Если объект обладает какой-то *внутренней структурой*, он будет характеризоваться внутренней динамикой, внутренними движениями. В соответствии с законами квантовой физики энергия таких движений *квантуется* — образует *дискретный спектр*. Исследование этого спектра как раз и является задачей *спектроскопии*.

На протяжении XX столетия физика прошла три этапа в познании строения вещества. На *первом этапе* рассматривалось строение атомов и молекул, исследовалась электронная оболочка атомов и молекул, ее роль в образовании химических связей. Этот этап связан с развитием *атомной физики, квантовой химии, квантовой электроники, зонной теории кристаллов*. На *втором этапе* рассматривалось строение атомного ядра как объекта, состоящего из протонов и нейтронов. Этот этап связан с развитием *ядерной физики*, исследованиями моделей атомных ядер, радиоактивности, ядерных реакций. На *третьем этапе* изучалась (и изучается) структура самих протонов и нейтронов или, более широко, кварковая структура адронов. Этот этап связан с развитием *физики элементарных частиц* и, в частности, *квантовой хромодинамики*.

В соответствии с тремя перечисленными этапами можно говорить о трех спектроскопиях.

Первая спектроскопия — это та самая спектроскопия, которая началась с основополагающих исследований Густава Кирхгофа и Роберта Бунзена в 60-х годах XIX столетия (см. § 5.4). К началу XX века был накоплен огромный эмпирический материал по линейчатым спектрам различных газов, сыгравший важную роль в период разработки модели атома и рождения квантовой механики. На страницах данной книги мы неоднократно обращались к первой спектроскопии, не называя ее, впрочем, «первой» (см., например, рис. 2 в таблице 12, рис. 1 в таблице 15, рисунки схем уровней и энергетических зон в таблицах 18 и 19, рис. 3 в таблице 20).

Теперь следует уделить какое-то внимание также второй и третьей спектроскопиям, сравнить их с первой. Обратимся к схемам энергетических уровней, представленным на рисунках в таблице 30. Здесь даны в качестве примера пять рисунков-схем.

Рисунки 1 и 2 относятся к первой спектроскопии. На рисунке 1 изображена схема уровней энергии нейтрального атома натрия, а на рисунке 2 — нейтрального атома ртути. Вертикальными стрелками показаны наблюдающиеся квантовые переходы для данных схем уровней. Обратим внимание читателя на то, что характерные расстояния между уровнями *соответствуют по порядку величины электронвольту* (эВ).

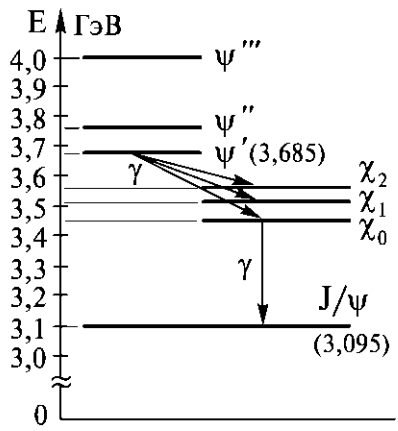
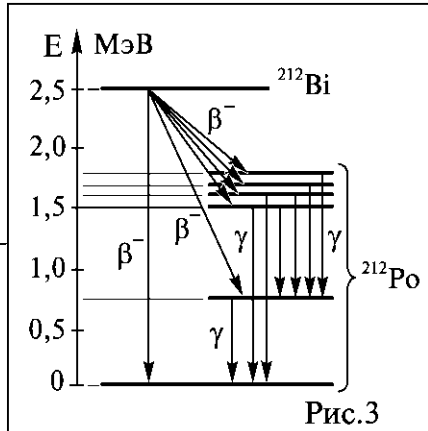
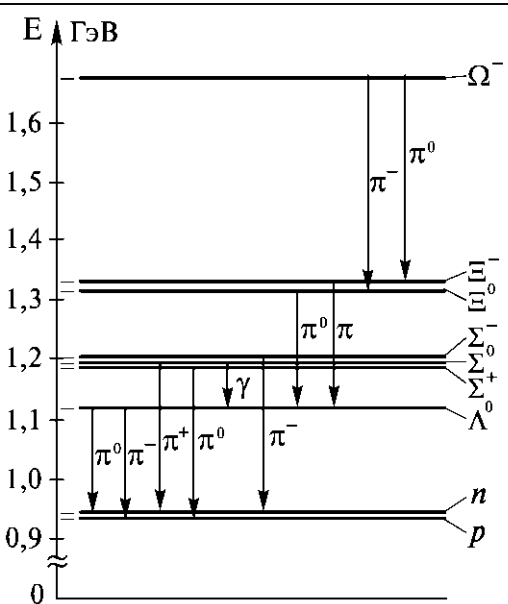
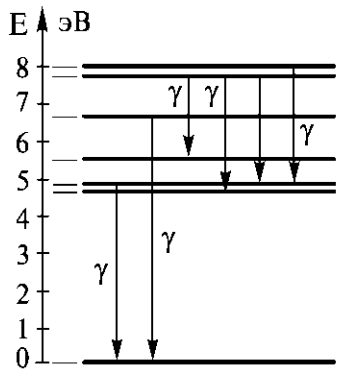
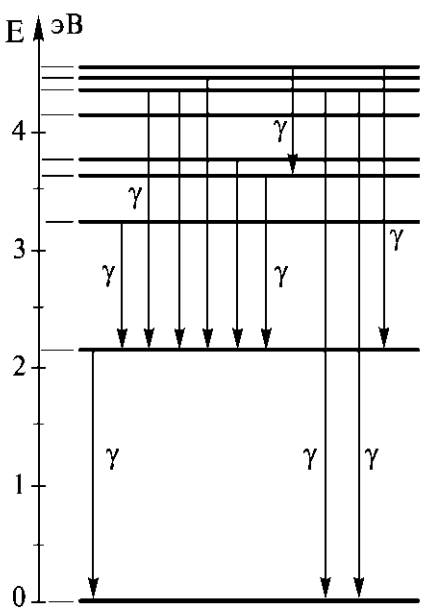
На рисунке 3 представлена схема уровней ядер ^{212}Bi и ^{212}Po , которую необходимо принимать во внимание при рассмотрении β -распада ядра ^{212}Bi . Эта схема энергетических уровней относится уже не к первой, а ко второй спектроскопии. Теперь характерные расстояния между уровнями оказываются в миллион (!) раз больше — они *измеряются в мегаэлектронвольтах* (МэВ).

Рисунки 4 и 5 относятся к третьей спектроскопии. На рисунке 4 дана схема уровней, отвечающих энергии $E = mc^2$ для долгоживущих барионов (от протона до омега-гиперона). Можно рассматривать гипероны как *возбужденные состояния* нуклонов (с точки зрения сильного взаимодействия). При квантовых переходах между этими состояниями высвобождается или, напротив, затрачивается энергия, соответствующая энергии $m_\pi c^2$, где m_π — масса пиона. На рисунке 5 показаны некоторые возбужденные уровни чармония; эти уровни соответствуют мезонным резонансам ψ' , ψ'' , ψ''' , χ' , χ'' , χ''' . Обратим внимание читателя на то, что в третьей спектроскопии характерные расстояния между энергетическими уровнями оказываются в тысячу раз больше, чем во второй спектроскопии — они *измеряются в гигаэлектронвольтах* (ГэВ).

Итак, три этапа в познании строения вещества — три спектроскопии. Три разных масштаба, используемых для измерения энергии квантовых переходов — электронвольты, мегаэлектронвольты, гигаэлектронвольты. В свое время Эрвин Шрёдингер, выражая свое активное неприятие самой идеи квантовых переходов, эмоционально заявил: «Если мы собираемся сохранить эти проклятые квантовые скачки, то я жалею, что вообще имел дело с квантовой теорией!» С тех пор прошло полвека, а «проклятые» квантовые переходы не только сохранились, но, более того, стали главным фактором, позволившим выделить пройденные наукой XX столетия основные этапы в познании строения вещества.

У истоков идеи квантового перехода, как *принципиально вероятностного* феномена (вероятностного не только в случае спонтанных, но также и вынужденных переходов) стоял Альберт Эйнштейн. Когда он пи-

Таблица 30. Три спектроскопии



сал в 1916 году свои знаменитые работы «Испускание и поглощение излучения по квантовой теории» и «К квантовой теории излучения» (см. § 8.4), он не подозревал, что, образно говоря, выпускает джина из бутылки. Этим джином явился *вероятностный механизм квантового перехода*, демонстрирующий *фундаментальность вероятностных закономерностей*. С чем, кстати сказать, великий ученый так и не смирился до конца своих дней.

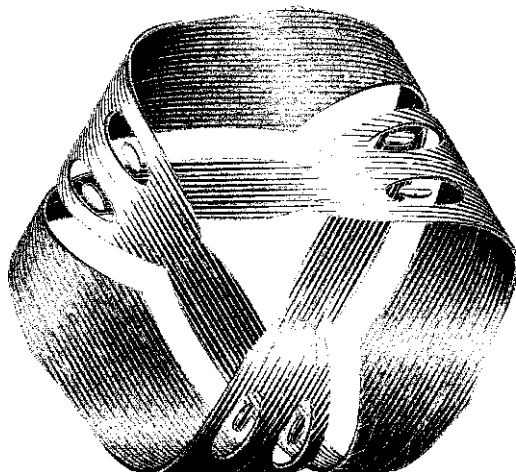
Но вернемся еще раз к рисункам-схемам в таблице 30. Стрелками на этих схемах показаны спонтанные квантовые переходы. Они имеют ту или иную *вероятность*, связанную со *временем жизни* Δt микрообъекта на соответствующем уровне. Чем больше время жизни, тем меньше вероятность. Согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга энер-

гетический уровень «размыт» на величину $\Delta E \approx \frac{h}{2\pi\Delta t}$. Однако на приведенных схемах все уровни энергии показаны без какого-либо уширения. Это объясняется масштабом энергетических шкал. Например, для уровня ψ' на рисунке 5 $\Delta E \approx 0,2$ МэВ, что соответствует $\Delta t \approx 3 \cdot 10^{-21}$ с. По сравнению с гигаэлектронвольт энергия 0,2 МэВ незначительна; поэтому на рисунке 5 уровень ψ' (как, впрочем, и остальные уровни) показан без уширения. А вот в рамках второй спектроскопии энергией 0,2 МэВ уже нельзя было бы пренебрегать. Что же касается первой спектроскопии, то энергетическое уширение 0,2 МэВ отвечало бы фактически непрерывно изменяющейся энергии.

В заключение приведем отрывок из выступления Вернера Гейзенберга на заседании Немецкого физического общества в 1975 году:

«Различие между элементарными и сложными частицами в принципе исчезло. В этом, пожалуй, важнейшее экспериментальное достижение последних пятнадцати лет. В ходе этих событий эксперименты все отчетливее подводят к важной аналогии: элементарные частицы есть нечто подобное стационарным состояниям атома или молекулы. Существует спектр частиц, подобно тому как существует спектр состояний, например атома железа...

Можно сказать, что экспериментальная физика частиц в ходе своего развития в последние годы выполняла те же функции, что спектроскопия в начале 20-х годов. Как тогда возникло большое собрание таблиц (так называемый справочник Пашена–Гётце, отражавший стационарные состояния всех атомных оболочек), так теперь существуют ежегодно уточняемые «Обзоры свойств частиц» («Reviews of Particle Properties»), где регистрируются стационарные состояния материи. Работа по составлению столь объемных таблиц примерно соответствует так называемому прощупыванию неба у астрономов. Каждый наблюдатель, естественно, надеется, что он в своей сфере однажды найдет какой-нибудь очень интересный объект».



ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ КАРТИНЫ МИРА

Любое свойство вещества: его цвет, твердость, температуру плавления, магнитные и электрические свойства, — нельзя понять и предсказать без квантовой теории... и всегда, когда мы хотим понять истинно глубокое явление Природы, мы неизбежно переходим на язык квантовых иероглифов. Быть может, это и есть родной язык Природы, знание которого современному человеку необходимо так же, как его далеким предкам — понимание языка диких животных.

Л.И. Пономарев

В прежней физике реакция системы на действие внешних сил однозначно определялась тем, что называли состоянием системы. Теперь знание состояния системы позволяет вычислить лишь вероятность ее реакции... Современная физика элементарных частиц информирует нас, строго говоря, о фунда-

ментальных структурах природы, а не о фундаментальных частицах. Эти структуры намного более абстрактны, чем нам казалось пятьдесят лет назад.

Вернер Гейзенберг

13.1 ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЧАСТИЦА?

Читатель. Странное дело: после того, как я поближе познакомился с физикой элементарных частиц, я стал ловить себя на мысли, что теперь мне труднее, чем это было раньше, ответить на вопрос «*что такое элементарная частица?*»

Автор. А какой ответ Вы давали раньше?

Читатель. Я всегда полагал, что *элементарными* следует считать частицы, у которых нет внутренней структуры, которые сами являются изначальными структурными «единицами» материи. Все многообразие существующих частиц должно состоять из *относительно небольшого* числа типов элементарных частиц. Все объекты можно хотя бы в принципе *разделить* на элементарные частицы.

Автор. Да, именно таково традиционное представление о том, что следует считать элементарными частицами. Начиная с 1932 года, стало ясно, что не только атомы, но также и атомные ядра определенно не являются элементарными частицами. Элементарными могут быть только *субъядерные* частицы. В те годы предполагали, что список элементарных частиц исчерпывается электроном, протоном, нейтроном, нейтрино и их античастицами. Плюс, конечно, фотон, который сам для себя является античастицей.

Читатель. Такое представление было вполне естественным. Тут не могло быть вопросов.

Автор. Вопросы, однако, возникали. Выяснилось, что нейтрон *самопроизвольно распадается* на протон и электрон (об электронном антинейтрино поначалу не знали). Согласно традиционному представлению отсюда следовало, что нейтрон *состоит* из протона и электрона. Но уже в 30-е годы прошлого столетия было ясно, что это не так — электрон принципиально не мог находиться внутри нейтрона при энергиях, характерных для β -распада. Следовательно, при β -распаде нейтрона происходил не распад, понимаемый в традиционном смысле, а *превращение*, в котором участвовали несколько элементарных частиц.

Читатель. В самом деле, что это за элементарные частицы, которые *самопроизвольно взаимопревращаются*? Фундаментальным «кирпичикам» материи это, пожалуй, «не к лицу».

Автор. Тем не менее со стабильностью как одной из характеристик элементарной частицы после открытия нейтрона было покончено. Все новые элементарные частицы с ненулевой массой оказывались нестабильными. К тому же этих «новых» частиц за три последующих десятилетия накопилось более двух сотен, и список элементарных частиц продолжал неумолимо расти.

Читатель. Прямо какая-то «каша» из частиц. Разве не следовало отказаться от термина «элементарный» по отношению к такому многообразию типов частиц?

Автор. В этой «каше» выделялись частицы, не участвующие в сильном взаимодействии. Их называли *лептонами* и выделили в отдельную группу, оказавшуюся весьма малочисленной. А все остальные частицы (*адроны*) продолжали традиционно называть элементарными, но уже таковыми их не считали. Появилась, как Вам известно, *кварковая модель адронов*.

Читатель. Как я понимаю, 12 фундаментальных фермионов (шесть кварков и шесть лептонов) плюс 12 их античастиц как раз и являются по-настоящему элементарными (истинно элементарными) частицами, из которых, в конечном счете, построена вся материя?

Автор. Чтобы получить имеющийся на сегодня список истинно элементарных частиц, добавьте к фундаментальным фермионам 13 фундаментальных бозонов (фотон, восемь глюонов, три промежуточных векторных бозона, гипотетический гравитон).

Читатель. Итак, всего $12 + 12 + 13 = 37$ истинно элементарных частиц. Это, конечно, меньше, чем несколько сотен. Но тоже многовато для фундаментальных «первоначал» материи.

Автор. Вы полагаете, что фундаментальных «первоначал» не может быть несколько десятков?

Читатель. Мне кажется, что их должно быть меньше. Тем более, что многие из перечисленных выше «первоначал» ученые сотворили в опытах на больших ускорителях. А где в природе наблюдаются фундаментальные фермионы второго и третьего поколений? Тут в самый раз вспомнить предостережение Гете, предупреждавшего об опасности искажения Природы в процессе ее исследования. Гете критиковал Ньютона, утверждая, что тот в своих оптических экспериментах выявил свойства не естественного (природного) света, а света, искаженного линзами, шелями, призмами. Я понимаю, что было бы несправедливо адресовать

Ньютону гетевское предостережение: «во всем подслушать жизнь стремись, спешат явления обездушить; забыв, что если в них нарушить одушевляющую связь, то больше нечего и слушать». Однако это предостережение, возможно, имеет прямое отношение к современной ситуации с фундаментальными частицами, *рожденными исключительно в лабораториях ученых с помощью ускорителей.*

Автор. Вопрос о роли, какую играли раньше и играют сегодня в окружающем нас мире фундаментальные фермионы второго и третьего поколений, является пока открытым. Это уже отмечалось раньше.

Читатель. Что ж, допустим, все без исключения упомянутые выше 37 «первоначал» необходимы Природе. Но возникает другой вопрос: может быть, эти «первоначала» *не по-настоящему фундаментальны?* Может быть, они сами состоят из каких-то «более элементарных» (более фундаментальных) субчастиц?

Автор. Интересно, как Вы понимаете в данном случае слово «состоят»?

Читатель. Я понимаю слово «состоят» как «имеют внутреннюю структуру». Подобно тому, как нуклоны состоят из кварков. Они обладают кварковой структурой.

Автор. Чтобы экспериментально установить в том или ином случае наличие или отсутствие внутренней структуры частицы, надо «обстреливать» эту частицу другими частицами, которые должны быть локализованы в очень малой области пространства и, следовательно, должны обладать весьма большим импульсом, а значит, и энергией. Стремясь все глубже «проникнуть» в структуру материи, ученые вынуждены все более и более увеличивать энергию этих «других» частиц. В результате энергия оказывается настолько большой, что вместо «раскалывания» исследуемой частицы на составные структурные «единицы» или «выбивания» из нее этих «единиц», происходит нечто совсем иное — *рождение уже знакомых частиц.*

Читатель. Получается, что проблема зашла в тупик! Мы принципиально не можем «докопаться» до «*самых элементарных*» частиц, какие бы большие ускорители ни были в нашем распоряжении.

Автор. Проблема не только в этом. Как мы с Вами уже выяснили (см. § 12.6), те или иные частицы могут рассматриваться *не как разные частицы, а как разные состояния одной и той же частицы.*

Читатель. Я вижу, что вопрос о том, какие частицы следует считать истинно элементарными, не может иметь окончательного решения. Получается, что материя в основе своей, на уровне «первоначал» непознаваема?

Автор. Нет, не получается. Просто традиционный метод ее познания, когда на каждом последовательном этапе ищется ответ на вопрос «что из чего состоит?», рано или поздно исчерпывает себя. Необходим принципиально иной подход — когда познание материи идет не по пути отыскания фундаментальных «кирпичиков», а по пути выявления фундаментальных принципов.

Читатель. Но в таком случае следует ли соглашаться с часто встречающимся утверждением, что именно физика элементарных частиц находится в авангарде процесса научного познания мира?

Автор. Безусловно, следует. Как заметил Вернер Гейзенберг, «современная физика элементарных частиц информирует нас, строго говоря, о фундаментальных структурах природы, а не о фундаментальных частицах». Исследование «первоначал» важно не столько ради самих «первоначал», а ради понимания «фундаментальных структур природы». И в этом отношении удалось многого достигнуть. Современная естественнонаучная картина мира является по сравнению с предыдущими картинами мира (механической и электромагнитной), с одной стороны, *значительно содержательней и детальней*, а с другой стороны, *менее наглядной*, требующей от нас более широкого обращения к абстрактным медалям.

Читатель. По-видимому, настало время поговорить о сущности современной естественнонаучной картины мира?

Автор. А мы говорим о ней, уже начиная с темы 8, т. е. с того момента как начали знакомиться с квантовой физикой. Теперь следует подвести итоги, а это лучше всего сделать, рассмотрев принципиальные *особенности* современной картины, выделив то, в чем она принципиально отличается от электромагнитной и, тем более, механической картины мира. Как известно, все познается в сравнении.

13.2 ВЕЩЕСТВО И ПОЛЕ

Понятия *вещества* и *поля* как двух видов материи появились в науке во времена Фарадея и Максвелла. Современная естественнонаучная картина мира сохранила эти понятия, но при этом сделала четыре существенных уточнения.

Первое уточнение. Вещество в современной Вселенной построено из *фундаментальных фермионов первого поколения* (e^- , ν_e , u , d плюс их античастицы).

Второе уточнение. Можно выделить четыре основных физических поля — гравитационное, электромагнитное, векторное поле слабого взаимодействия, глюонное поле (цветовое поле). Все поля квантуются. Их квантами являются, соответственно, гравитон, фотон, три промежуточных векторных бозона (W^+ , W^- , Z^0) и восемь типов глюонов, различающихся цветовыми зарядами. Все эти кванты объединяют в группу *фундаментальных бозонов*. Указанным основным физическим полям отвечают четыре фундаментальных взаимодействия — *гравитационное, электромагнитное, слабое, сильное*. Переносчиком гравитационного взаимодействия является гипотетический гравитон. Переносчиком электромагнитного взаимодействия является фотон. Переносчиками слабого взаимодействия являются три промежуточных векторных бозона. Переносчиками сильного взаимодействия являются восемь глюонов.

Третье уточнение. *На уровне элементарных частиц вещество и физические поля взаимопревращаются.* Примеры превращений: $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$; $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$; $\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$. Как видно из рисунка 2 в таблице 27, при распаде нейтрона происходят превращения: $d \rightarrow u + W^-$ и $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$. Из рисунка 3 в таблице 27 видно, что реакция распада π^+ -мезона ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) предполагает превращение $u + \bar{d} \rightarrow W^+$ (вещество превращается в поле) и превращение $W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (поле превращается в вещество). Из рисунка 6 в таблице 28 видно, что в процессе рождения пары странных частиц ($\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$) происходят превращения $u + \bar{u} \rightarrow g$ (вещество превращается в поле) и превращение $g \rightarrow s + \bar{s}$ (поле превращается в вещество).

Четвертое уточнение. При одних и тех же энергиях частиц интенсивность процессов (их длительность) определяется тем, какое фундаментальное взаимодействие обуславливает тот или иной процесс. При энергиях порядка 1 МэВ процессы, обусловленные сильным взаимодействием, протекают значительно интенсивнее (в 10^3 – 10^4 раз быстрее), чем процессы, обусловленные электромагнитным взаимодействием, а последние протекают значительно интенсивнее (более чем в 10^{10} раз быстрее) по сравнению с процессами, обусловленными слабым взаимодействием. Однако эта ситуация существенно изменяется с *возрастанием энергии частиц*. При достаточно высоких энергиях (порядка 100 ГэВ) обмен промежуточными векторными бозонами может совершаться столь же эффективно, как и обмен фотонами; происходит «объединение» слабого и электромагнитного взаимодействий. В § 11.7 мы отмечали создание *объединенной теории электромагнитного и слабого взаимодействия* (т. н. теории электрослабого взаимодействия) физиками-теоретиками Вайнбергом, Глэшоу, Саламом.

13.3 МИР ВЗАИМОПРЕВРАЩЕНИЙ

Характерная черта мира элементарных частиц — *взаимопревращаемость*. Электромагнитной картине была присуща стабильность; недаром ее основу составляли стабильные «элементарные кирпичики» — электрон и протон, а затем фотон. Оказалось, однако, что стабильность частиц — это *исключение*, особый случай, а правилом является как раз нестабильность. *Практически все элементарные частицы нестабильны*. Они самопроизвольно распадаются, или точнее сказать, превращаются в другие частицы. Взаимопревращения происходят не только при спонтанных распадах, но и при *столкновениях частиц*. Предположим, сталкиваются два протона; при этом могут наблюдаться, например, такие превращения:

$$\begin{aligned} p + p &\rightarrow p + n + \pi^+; \\ p + p &\rightarrow p + \Lambda^0 + K^+; \\ p + p &\rightarrow p + \Sigma^+ + K^0; \\ p + p &\rightarrow n + \Lambda^0 + K^+ + \pi^+; \\ p + p &\rightarrow p + \Xi^0 + K^0 + K^+; \\ p + p &\rightarrow p + p + p + \bar{p}. \end{aligned}$$

Нетрудно подсчитать, что сумма масс покоя частиц, рождающихся в этих процессах, превышает удвоенную массу покоя протона соответственно в 1,07, 1,36, 1,4, 1,43, 1,73, 2 раза. Значит, в данных процессах должна быть достаточно велика кинетическая энергия сталкивающихся протонов, поскольку часть ее пойдет на образование массы родившихся частиц.

Увеличивая кинетическую энергию протонов, можно наблюдать процессы, в которых число рождающихся частиц будет возрастать. В принципе можно вообразить поистине фантастическую картину: столкновение двух протонов, обладающих гигантской энергией, приводит к возникновению галактики!

Предположим, что, желая «расщепить» протоны, выбить из них кварки, мы стали бы обстреливать их фотонами, постепенно увеличивая энергию последних. Вместо расщепления мы наблюдали бы различные процессы взаимодействия — например, такие:

$$\begin{aligned} \gamma + p &\rightarrow p + \pi^0; \\ \gamma + p &\rightarrow n + \pi^+; \\ \gamma + p &\rightarrow p + \pi^- + \pi^+; \\ \gamma + p &\rightarrow p + p + \bar{p}. \end{aligned}$$

Этот пример показывает, что благодаря взаимопревращениям частиц оказываются бесплодными попытки расщепить одни частицы, обстреливая их другими. Происходит не расщепление обстреливаемых частиц, а рождение других частиц; *они рождаются за счет энергии сталкивающихся частиц*. Ну как тут не вспомнить Гете. Его Фауст, говоря о Природе, заметил:

То, что она желает скрыть в тени
Таинственного своего покроя,
Не выманить винтами шестерни,
Ни силами орудья никакого.

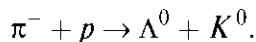
Как не посочувствовать Фаусту, сетовавшему на то, что «у Природы крепкие затворы»!

Процессы взаимопревращений частиц физики изучают, используя фотоэмульсии с очень высоким разрешением или пузырьковую камеру. В фотоэмульсии и в камере заряженные частицы оставляют хорошо наблюдаемые следы (треки). Пролетающая через камеру с жидким водородом в перегретом состоянии заряженная частица вызывает кипение водорода вдоль своего пути, в результате чего и образуется трек из мелких пузырьков. Если поместить камеру в сильное магнитное поле, то треки частиц окажутся слегка изогнутыми, причем искривление частиц с разными по знаку зарядами будет происходить в разные стороны.

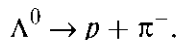
В таблице 31 даны пять рисунков; на каждом представлен полученный в жидководородной пузырьковой камере снимок треков частиц и тут же приведена схема, поясняющая взаимопревращения, зафиксированные на снимке. На всех снимках линии магнитной индукции направлены перпендикулярно к плоскости снимка в сторону от наблюдателя (в отличие от снимка на рисунке 4 в таблице 25, где линии магнитной индукции были направлены навстречу наблюдателю).

Итак, рассмотрим снимки на рисунках 1–5 в таблице 31.

На рисунке 1 π^- -мезон с энергией порядка 1 ГэВ столкнулся в точке 1 с протоном, находившимся в водородсодержащей камере, в результате чего произошло превращение:



В точке 2 Λ^0 -гиперон превратился в протон и π^- -мезон:



В точке 3 K^0 -мезон превратился в три частицы:

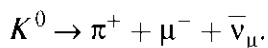
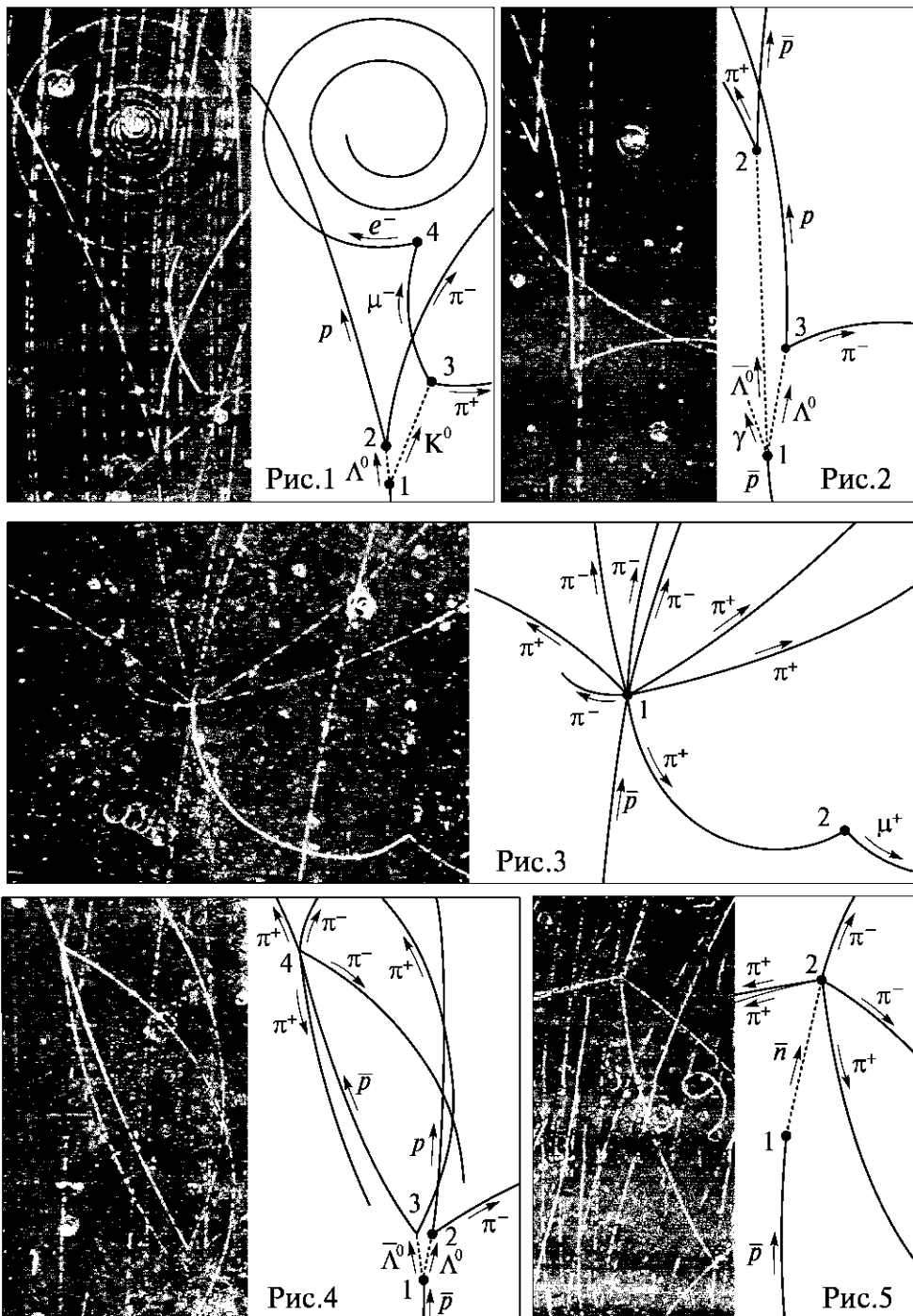


Таблица 31. Взаимопревращения элементарных частиц (снимки треков)



Первые две из них оставили след на снимке, а антинейтрино, естественно, не просматривается. В точке 4 мюон превратился в электрон, мюонное нейтрино и электронное антинейтрино:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e.$$

Родившийся электрон оставил след в виде скручивающейся спирали; ее радиус уменьшается по мере того, как уменьшается энергия электрона.

На рисунке 2 антипротон, обладающий энергией порядка 1 ГэВ, столкнулся в точке 1 с протоном и произошло, как показал тщательный анализ снимка (мы на нем не останавливаемся), рождение антигиперона $\bar{\Sigma}^0$ и Λ^0 -гиперона:

$$\bar{p} + p \rightarrow \bar{\Sigma}^0 + \Lambda^0.$$

Весьма быстро (благодаря электромагнитному, а не слабому взаимодействию) антигиперон $\bar{\Sigma}^0$ распался:

$$\bar{\Sigma}^0 \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \gamma.$$

Указать на снимке точку, в которой произошел этот распад, невозможно, поскольку тут все участники процесса электрически нейтральны. Но заранее ясно, что эта точка фактически совпадает с точкой 1, поскольку время жизни $\bar{\Sigma}^0$ составляет $6 \cdot 10^{-20}$ с, т. е. в 10^{10} раз меньше времени жизни антигиперона $\bar{\Lambda}^0$. Последний испытал распад в точке 2:

$$\bar{\Lambda}^0 \rightarrow \bar{p} + \pi^+,$$

а в точке 3 распался Λ^0 -гиперон:

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-.$$

На рисунке 3 антипротон аннигилировал с протоном в точке 1, в результате чего родились восемь заряженных пионов:

$$\bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^- + \pi^-.$$

Один из пионов в точке 2 превратился в антимюон μ^+ и мюонное нейтрино:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu.$$

На рисунке 4 зафиксированы следующие превращения:

- в точке 1: $\bar{p} + p \rightarrow \Lambda^0 + \Lambda^0$;
- в точке 2: $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$;
- в точке 3: $\Lambda^0 \rightarrow \bar{p} + \pi^+$;
- в точке 4: $\bar{p} + p \rightarrow \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^-$.

На рисунке 5 в точке 1 при столкновении антипротона с протоном родилась пара, состоящая из нейтрона и антинейтрона:

$$\bar{p} + p \rightarrow n + \bar{n}.$$

Дальнейшая судьба родившегося нейтрона неизвестна. А вот антинейтрон в точке 2 столкнулся с протоном, в результате чего родились пять заряженных пионов:

$$\bar{n} + p \rightarrow \pi^{-} + \pi^{+} + \pi^{+} + \pi^{-} + \pi^{-}.$$

13.4 МИР ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ, ОГРАНИЧИВАЮЩИХ ВЗАИМОПРЕВРАЩЕНИЯ

Итак, современная естественнонаучная картина мира, рассматриваемая на уровне микроявлений, — это *картина взаимопревращений*. На первый взгляд может показаться, что возможны *любые* взаимопревращения. Но это не так. Выявлены определенные законы, *регулирующие* взаимопревращения частиц. Существенно, что эти законы выступают в роли не *предписывающих*, а *запрещающих* правил.

Заметим, что запрещающие правила отнюдь не являются обращенной формой предписывающих правил. Приведем пример из области дорожных знаков. Предположим, что перед перекрестком поставлен синий знак «движение только вперед». Это предписывающий знак: он однозначно определяет дальнейшее движение автомобиля — только вперед. Если же перед перекрестком поставлен красный запрещающий знак «поворот направо запрещен», то дальнейшее поведение автомобиля уже не является однозначно определенным — он может двигаться вперед, но может повернуть налево или даже развернуться; ему запрещено лишь поворачивать направо.

Далее вообразим два разных мира, которые условно назовем синим и красным. В синем мире реализуется то и только то, что предписано определенными законами (правилами), а в красном мире реализуется все, что не запрещено определенными законами (правилами). Иначе говоря, в синем мире *исключены все ситуации, не разрешенные законами*, а в красном мире *допустимы все ситуации, не запрещенные законами*.

Механическую и электромагнитную картины мира можно соотнести с нашим условным синим миром (*безальтернативным* миром), тогда как современную естественнонаучную картину мира следует соотносить с нашим условным красным миром, *характеризующимся многими*

альтернативами. Как выразился один американский физик (К. Форд), «согласно старым представлениям, фундаментальные законы природы должны быть законами дозволения; они определяют то, что может и должно происходить в природе. Согласно же новой точке зрения, наиболее фундаментальные законы носят характер запретов; они определяют лишь то, что не может происходить в природе».

Что же представляют собой эти фундаментальные законы, имеющие характер законов запрета? — Ими являются *законы сохранения. Возможны любые взаимопревращения элементарных частиц, которые не запрещены законами сохранения.*

Прежде всего отметим законы сохранения *энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда.* Кроме того ученые рассматривают ряд физических величин (специфических «зарядов»), сохранение которых также регулирует взаимопревращения частиц. К ним относятся *барионный и лептонный заряды, четность (пространственная, временная, зарядовая), странность, очарование* и др. Некоторые из них (например, четность, странность, очарование) сохраняются в процессах, обусловленных электромагнитным или сильным взаимодействием, но не сохраняются в процессах, обусловленных слабым взаимодействием.

Как отмечалось в § 11.10, распад электрона запрещен законами сохранения энергии, импульса и электрического заряда, а распад протона запрещен законами сохранения энергии, импульса и барионного заряда. Напомним также, что странная «долгоживучесть» гиперонов и каонов связана с сохранением странности в электромагнитном и сильном взаимодействиях, а «долгоживучесть» очарованных адронов — с сохранением очарования.

Ранее, в § 4.4 в книге «Случайность, необходимость, вероятность» мы упоминали доказанную *Эмми Нётер* теорему, согласно которой *законы сохранения тех или иных величин обусловлены симметрией природных законов.* Так, сохранение энергии есть следствие инвариантности законов природы по отношению к *переносам во времени*; сохранение импульса — следствие инвариантности законов природы по отношению к *переносам в пространстве*; сохранение момента импульса — следствие инвариантности законов природы по отношению к *поворотам в пространстве.* Пространственная четность сохраняется вследствие инвариантности законов природы по отношению к *зеркальному отражению* (вследствие симметрии данного мира и зазеркального); временная четность сохраняется вследствие инвариантности законов природы по отношению к *обращению времени*; зарядовая четность сохраняется вследствие инвариантности законов природы по отношению к *замене всех*

частиц на соответствующие античастицы (вследствие симметрии данного мира и антимира).

Следует вместе с тем отметить, что в настоящее время мы не знаем, с какой симметрией законов природы связаны сохранение лептонного и барионного зарядов, странности, очарования, прелести, истины. Пока эти законы сохранения предстают перед нами не более как экспериментально установленные *правила запрета* в альтернативном мире элементарных частиц.

13.5 Мир, ПОСТРОЕННЫЙ НА ВЕРОЯТНОСТИ

Важно обратить внимание читателя не только на то, что возможны любые взаимопревращения элементарных частиц, не запрещенные законами сохранения (несколькими или хотя бы одним). Нужно также отметить, что возможные взаимопревращения (те, что не запрещены законами сохранения) *подчиняются закономерностям*. Разумеется, не жестко детерминированным закономерностям, а *вероятностным*.

Напомним, что как механическая, так и электромагнитная картина мира были построены на динамических (однозначных) закономерностях. Вероятность там, если и допускалась, то лишь в связи с неполнотой наших знаний. Считалось само собой разумеющимся, что с ростом знаний и уточнением деталей вероятностные законы должны уступить место законам динамическим как наиболее фундаментальным.

Существенно, что в современной естественнонаучной картине мира фундаментальными (лежащими, что называется, в самой природе вещей) *оказываются не динамические, а как раз вероятностные закономерности*. Фундаментальность вероятностных закономерностей обнаруживается при рассмотрении взаимопревращений частиц или, более широко, *квантовых переходов* (тех самых, которые проклинал Шредингер, и с которыми не смог примириться Эйнштейн). Заметим, что квантовый переход, строго говоря, не является «переходом» как таковым — это всякий раз какое-то *превращение*. Либо превращение данного микрообъекта, находившегося в данном состоянии, в тот же микрообъект, но в другом состоянии. Либо превращение одного микрообъекта в другой микрообъект или группу микрообъектов. Как уже отмечалось в § 13.1, не всегда удастся четко различить, имеем ли мы в том или ином случае дело с разными частицами или с разными состояниями одной и той же частицы. Так или иначе, но все превращения на уровне микроявлений

принципиально вероятностны, все квантовые переходы имеют вероятностную природу. А поскольку эти превращения (квантовые переходы) составляют основу материального мира, то можно с полным основанием утверждать, что мы живем в мире, *построенном на вероятности*.

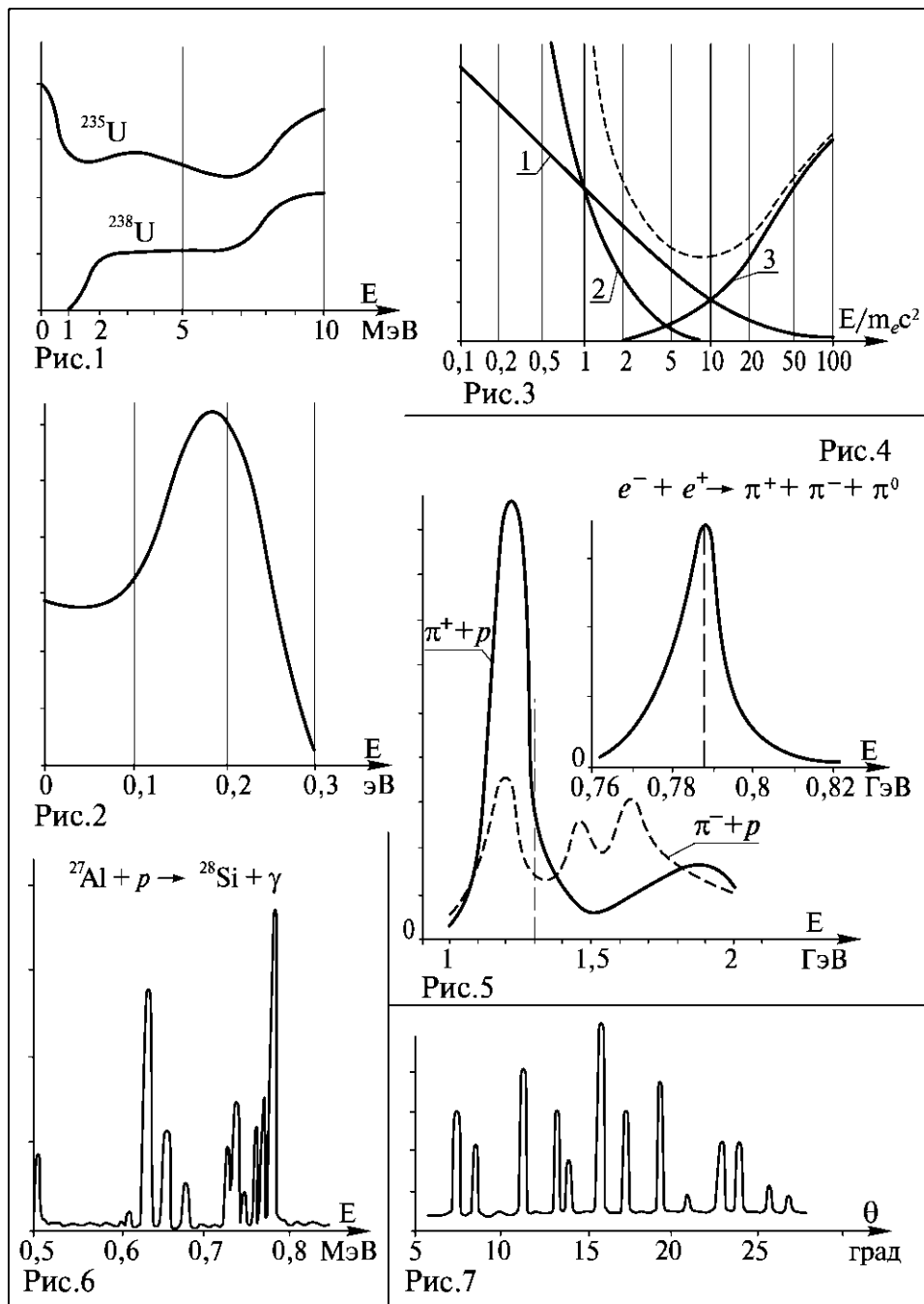
Когда, например, протон сталкивается с протоном, принципиально нельзя предсказать, родятся ли при этом новые частицы, а если родятся, то какие именно. Продуктами столкновения могут стать протон, нейтрон и π^+ -мезон. Или протон, Λ^0 -гиперон и K^+ -мезон. Или три протона и антипротон. Или какие-то другие частицы, образование которых не запрещено законами сохранения. Можно говорить лишь о *вероятности* того или иного превращения.

Нельзя точно предсказать момент распада той или иной нестабильной частицы; можно говорить лишь о *вероятности* «прожить» частице до распада то или иное время. Приводимое в таблицах время жизни различных элементарных частиц имеет вероятностную природу; оно усреднено по большому числу распадов. Если имеются несколько схем распада данной частицы, то нельзя точно предсказать, по какой именно схеме произойдет распад. Можно говорить лишь о *вероятности* реализации той или иной схемы распада. В таблице 26 приведены относительные вероятности схем распада «долгоживущих» элементарных частиц, открытых до 1965 года.

Например, Ω^- -гиперон может спонтанно превратиться либо в Λ^0 -гиперон и K^- -мезон (схема 1), либо в Ξ^0 -гиперон и π^- -мезон (схема 2), либо в X^- -гиперон и π^0 -мезон (схема 3). Из тысячи случаев распада Ω^- -гиперона примерно в 680 случаях реализуется схема 1, примерно в 230 случаях — схема 2, примерно в 80 случаях — схема 3. Это означает, что относительные вероятности рассматриваемых схем распада равны, соответственно, 0,68, 0,23, 0,08. Недовыбранная вероятность 0,01 относится к достаточно редко реализуемым схемам: $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + e^- + \bar{\nu}_e$, $\Omega^- \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + \pi^-$ и др.

Обратимся теперь к таблице 32. Здесь даны семь рисунков, на которых графически представлены некоторые зависимости, полученные экспериментально (использованы данные экспериментов в области атомной физики, ядерной физики, физики элементарных частиц). Обратим внимание читателя на то, что на всех графиках не объясняется смысл оси ординат. Дело в том, что в разных примерах пришлось бы связывать с этой осью либо интенсивность процесса (рисунки 6 и 7), либо коэффициент поглощения (рисунок 3), либо часто используемую при исследовании микроявлений величину, называемую *сечением процесса* (рисунки 1, 2, 4, 5). А между тем во всех приведенных в таблице 32

Таблица 32. Вероятность в мире элементарных частиц



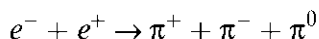
примерах значения величин, откладываемых по оси ординат, *пропорциональны вероятности соответствующего процесса*. Так что на графиках, представленных на рисунках 1–7, рассматриваются по сути дела *зависимости тех или иных вероятностей*.

Рисунок 1 демонстрирует зависимость вероятности деления ядер ^{238}U и ядер ^{235}U от энергии нейтронов, поглощенных этими ядрами. Можно видеть, что вероятность деления ядер ^{238}U равна нулю при энергиях нейтронов ниже 1 МэВ. Недаром в атомных реакторах используют уран, обогащенный изотопом ^{235}U .

Рисунок 2 демонстрирует зависимость от энергии нейтрона вероятности поглощения нейтронов ядрами кадмия. Эта вероятность высока при энергиях нейтронов менее 0,3 эВ. Именно поэтому в атомных реакторах на тепловых нейтронах применяют кадмиевые стержни для регулирования уровня мощности реактора (см. § 10.8).

Графики на рисунке 3 показывают, как изменяется с энергией фотонов вероятность их поглощения в свинце. График 1 характеризует вероятность поглощения за счет эффекта Комптона (исходный фотон поглощается одним из атомных электронов, который затем испускает новый фотон, с меньшей энергией). График 2 характеризует вероятность поглощения за счет фотоэффекта (фотон поглощается атомным электроном, который затем покидает атом). График 3 характеризует вероятность поглощения за счет рождения электронно-позитронной пары. Результирующий (суммарный) график показан пунктирной кривой. Обратим внимание на то, что для оси абсцисс здесь использована логарифмическая шкала.

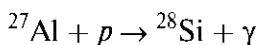
На рисунке 4 мы можем наблюдать вероятность процесса



в зависимости от энергии E , представляющей собой сумму энергий электрона и позитрона во встречных пучках. При столкновении электрона и позитрона может образоваться короткоживущий резонанс ω (с массой около $3300 m_e$), который за время порядка 10^{-24} с распадается по схеме $\omega \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$.

На рисунке 5 демонстрируются вероятности рассеяния на протоне положительно и отрицательно заряженных пионов в зависимости от энергии пионов. Большой максимум на сплошной кривой соответствует короткоживущему резонансу Δ (он образуется в реакции $\pi^+ + p \rightarrow \Delta$) с массой около $2400 m_e$ и временем жизни $5 \cdot 10^{-24}$ с.

На рисунке 6 можно наблюдать вероятность процесса



в зависимости от энергии протонов. Резкие пики на графике демонстрируют наличие возбужденных состояний ядер ^{28}Si , возникающих при поглощении протонами ядер алюминия.

На рисунке 7 приведена нейтронограмма поликристаллического образца BiFeO_3 . Она демонстрирует вероятность рассеяния на тот или иной угол θ нейтронов с энергией порядка 0,01 эВ. Заметим, что с подобной кривой мы уже встречались — см. рис. 5 в таблице 17.

13.6 ФИЗИЧЕСКИЙ ВАКУУМ В СОВРЕМЕННОЙ КАРТИНЕ МИРА

В прежних картинах мира вакуум рассматривался как *пустота*; ее мог заполнять разве лишь невесомый таинственный эфир. В современной картине вакуум — не пустота в обычном смысле, а *основное состояние физического поля*; он «заполнен» *виртуальными частицами*, к которым мы не раз обращались на страницах данной книги.

Рассмотрим для примера электромагнитное поле; его кванты — фотоны. Если исчезает фотон с частотой ν , то энергия поля уменьшается на $h\nu$ — происходит изменение состояния поля. Вообразим на минуту, что все фотоны исчезли, так что дальнейшая отдача энергии полем стала невозможной. Согласно квантовой теории поля это отнюдь не означает, что электромагнитное поле перестало существовать. Просто оно перешло в состояние с *наинизшей возможной энергией* (основное состояние поля). Поскольку в таком состоянии реальных (наблюдаемых на опыте) фотонов нет, то его естественно называть *вакуумным состоянием* электромагнитного поля или, проще, *фотонным вакуумом*.

В фотонном вакууме нет реальных фотонов, но в нем спонтанно появляются и исчезают виртуальные фотоны, электроны, позитроны, которые, в свою очередь, обуславливают появление (с последующим исчезновением) виртуальных мезонов и антимезонов, нуклонов и антинуклонов и т. д. Физический вакуум представляет собой пространство, в котором беспрестанно рождаются и уничтожаются мириады виртуальных частиц. Энергия E отдельной виртуальной частицы определяется, как уже отмечалось, соотношением неопределенностей $E \approx h/2\pi\Delta t$, где Δt — время существования частицы. Эта энергия берется из вакуума и возвращается в вакуум. Можно сказать, что *энергия основного состояния электромагнитного поля все время перераспределяется случайным образом между виртуальными частицами*. Однако воспользоваться каким-либо образом энергией вакуума мы, естественно, не можем — ведь это

наинизшее энергетическое состояние поля. При наличии внешнего источника энергии можно реализовать *возбужденные состояния поля* — тогда будут наблюдаться обычные (не виртуальные) частицы.

Хотя электромагнитное поле в вакуумном состоянии не может быть поставщиком энергии, это не означает, что оно никак не может проявить себя и тем самым продемонстрировать *реальность* перераспределений энергии основного состояния, происходящих в хаосе взаимопревращений виртуальных частиц. Реальность такой картины подтверждается наблюдаемыми на опыте эффектами *поляризации вакуума*. Ведь если между двумя электрическими зарядами (например, между электроном и протоном в атоме водорода) находится не просто пустое пространство, а пространство, «заполненное» возникающими и исчезающими виртуальными заряженными частицами, то в этом случае должна происходить некоторая *экранизация* кулоновского взаимодействия между рассматриваемыми электрическими зарядами. Не входя в детали, отметим, что опыт подтвердил наличие такой экранизации.

Здесь уместно привести выдержку из популярной книги «Квантовая физика для больших и маленьких», принадлежащей перу известного российского физика-теоретика академика *Аркадия Бейнусовича Мигдала* (1911–1991) (М.: «Наука», 1989):

«Нулевые колебания электромагнитного поля заставляют «дрожать» электрон, движущийся в атоме, — он как бы превращается в шарик с радиусом, равным амплитуде «дрожания». Но шарик слабее взаимодействует с ядром, чем точечный электрон. В результате энергетические уровни атома водорода слегка сдвигаются по сравнению со значением, вычисленным без учета «дрожания». Это явление называется «лэмбовским сдвигом», по имени впервые наблюдавшего его американского экспериментатора Уиллиса Лэмба. Квантовая электродинамика позволяет рассчитать «лэмбовский сдвиг» с огромной точностью. Получается удивительнейшее совпадение с данными, полученными в эксперименте».

13.7 ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О СОВРЕМЕННОЙ КАРТИНЕ МИРА

Важно подчеркнуть, что в отличие от предыдущих картин мира современная картина рассматривает мир на *существенно более глубоком, более фундаментальном уровне*. Атомистическая концепция присутствовала во всех прежних картинах; однако только теперь удалось создать теорию атома, позволившую объяснить периодическую систему химических элементов, образование различных видов химических связей, многочисленные физические и химические явления. Только теперь уда-

лось создать теорию атомного ядра и исследовать многообразные ядерные реакции, ответственные за превращения одних химических элементов в другие. Современная картина раскрыла мир микроявлений, исследовала необычные свойства микрообъектов и в результате самым радикальным образом воздействовала на вырабатывавшиеся веками представления, заставив пересмотреть их и во многих случаях решительно порвать с традиционными взглядами и подходами.

Все прежние картины мира страдали своей *метафизичностью*; они исходили из четкого разграничения всех исследуемых сущностей, их стабильности, статичности. Сначала они преувеличивали роль механических движений, законов механики, а затем электромагнитных явлений, стремясь в одном случае свести все законы природы к механике, а в другом — к электромагнетизму. Такая ориентация на крайности, на четкие и безусловные разграничения с претензией на завершенность выполненных исследований метафизична по самой своей сути. Современная естественнонаучная картина мира решительно порывает с подобной ориентацией. В ее основе богатство взаимопревращений, игра случая, многообразие явлений. Основанная на вероятностных законах, современная картина мира *диалектична*. Естественно, что она значительно точнее, чем прежние картины, отражает диалектически противоречивую реальность.

Вещество, поле, вакуум рассматривались раньше отдельно. В современной картине как вещество, так и поле состоят из элементарных частиц, а частицы взаимопревращаются (самопроизвольно либо при столкновениях друг с другом). Более того, вакуум тоже «состоит» из частиц (виртуальных частиц), которые взаимодействуют как друг с другом, так и с реальными частицами. Таким образом, фактически исчезает граница между веществом и полем, а также граница между вакуумом, с одной стороны, и веществом и полем — с другой. *На фундаментальном уровне многие грани в природе утрачивают свою четкость, «размываются», оказываются в определенной степени условными.*

Если раньше речь шла о картинах мира как картинах чисто *физических*, то теперь для картины мира характеристика «физическая» была бы слишком узкой. В этой картине физика тесно объединяется с другими естественными науками — она фактически сливается с химией и выступает в теснейшем союзе с биологией. Недаром современную картину мира характеризуют как *естественнонаучную*. Размываются границы между традиционными разделами внутри самой физики. Даже такие, казалось бы, далекие друг от друга разделы, как астрофизика и физика элементарных частиц, оказываются взаимосвязанными столь сильно, что приходится говорить о *подлинной революции в космологии* (см. тему 14).

13.8 СМЕНА ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ ТРАДИЦИИ

Все прежние картины мира создавались как бы *извне* — исследователь изучал окружающий мир *отстраненно*, вне связи с собой, в полной уверенности, что *можно исследовать явления, не нарушая их течения*. Такова была веками закреплявшаяся естественнонаучная традиция. «В науке прошлого, — писал академик Никита Николаевич Моисеев, — с ее стремлением к прозрачным и ясным схемам, с ее глубокой убежденностью, что мир в своей основе достаточно прост, человек превратился в стороннего наблюдателя, изучающего мир «извне». Возникло странное противоречие — человек все-таки существует, но существует как бы сам по себе. А космос, природа — тоже сами по себе. И объединялись они, если это можно назвать объединением, только на основе религиозных воззрений».

В процессе создания современной картины мира эта естественнонаучная традиция решительно ломается. Она сменяется принципиально иным подходом к изучению природы; теперь научная картина мира создается уже не «извне», а «изнутри», *сам исследователь становится неотъемлемой частью создаваемой им картины*.

Об этом хорошо сказал Вернер Гейзенберг: «В поле зрения современной науки прежде всего — сеть взаимоотношений человека с природой, те связи, в силу которых мы, телесные существа, представляем собой часть природы, зависящую от других ее частей, и в силу которых сама природа оказывается предметом нашей мысли и действия только вместе с самим человеком. Наука уже не занимает позиции только наблюдателя природы, она осознает себя как частный вид взаимодействия человека с природой. Научный метод, сводящийся к изоляции, аналитическому объяснению и упорядочению, натолкнулся на свои границы. Оказалось, что его действие изменяет и преобразует предмет познания, вследствие чего сам метод уже не может быть отстранен от предмета. В результате естественнонаучная картина мира, по существу, перестает быть только естественнонаучной».

К началу XX столетия в России сформировалось умонастроение, предвидевшее грядущую смену естественнонаучной традиции. Это так называемый *русский космизм*. Он предполагал синтез естественнонаучной и философской мысли, рассматривал изучающего природу человека как участника происходящих в природе процессов, в том числе и процессов, происходящих в космосе. В связи с этим отметим ряд выдающихся ученых. К ним, в частности, относятся: *Иван Михайлович Сеченов* (1829–1905), считавший, что человека надо изучать в единстве его психики, физиологии и окружающей среды; *Константин Эдуардович Циолковский* (1857–1935), веривший в восходящее развитие мира и самой природы

человека, в эволюционную предопределенность выхода человечества в космическое пространство; *Александр Леонидович Чижевский* (1897–1964), сформулировавший на основе долголетних наблюдений закон, согласно которому «состояние предрасположения к поведению человеческих масс есть функция энергетической деятельности Солнца».

Отдельно отметим украинского ботаника и микробиолога *Николая Григорьевича Холодного* (1882–1953), который в своем труде «Мысли натуралиста о природе и человеке» рассмотрел новое мировоззрение, названное им *антропокосмизмом*, противопоставив его прежнему (традиционному) мировоззрению — «антропоцентризму».

Н.Г. Холодный отмечал, что антропоцентрическое мировоззрение в течение многих веков сохраняет четыре основных особенности: а) убеждение, что человек по своей природе есть существо высшее, существо особого рода; б) переоценку значения человека в мироздании, доходящую подчас до утверждения, что все в мире создано для удовлетворения потребностей человека как царя и влостителя природы; в) очеловечивание или одухотворение органической и частично даже неорганической природы; г) уверенность в том, что для познания внешнего мира все существенное можно почерпнуть из внутреннего, духовного мира человека и что, изучая этот последний, можно выявить основные закономерности природы.

Говоря о новом мировоззрении — антропокосмизме, — Н.Г. Холодный подчеркивал как самое характерное «постоянное ощущение человеком своей органической, неразрывной и действенной связи с природой, со всем космосом». Он писал: «В отношения человека к природе все в большей мере проникают новые начала — стремление не только подчинить ее силы своей воле, но и как можно глубже проникнуть в тайны структуры и эволюции космоса, материи, безотносительно к возможности использования приобретенных знаний для практических целей».

Особенно ярко новый подход к исследованию природы продемонстрировал выдающийся российский ученый академик *Владимир Иванович Вернадский* (1863–1945) — основатель геохимии, биогеохимии, радиогеологии, мыслитель, намного опередивший свое время, создатель учения о *ноосфере* — *сфере Разума*. Вернадский рассматривал человека как важнейшее звено в процессе эволюции природы — он не только подвергается влиянию природных процессов, но и способен, будучи носителем разума, *целенаправленно воздействовать на эти процессы*. Как отмечал академик Моисеев, «учение о ноосфере оказалось как раз тем звеном, которое позволяет связать картину, рожденную современной физикой, с общей панорамой развития жизни — не только биологической эволюции, но и общественного прогресса... Очень многое нам еще неясно и скрыто от нашего взора. Тем не менее сейчас перед нами

развертывается *грандиозная гипотетическая картина процесса самоорганизации материи от Большого взрыва до современного этапа, когда материя познает себя, когда ей становится присущ разум, способный обеспечить ее целенаправленное развитие*» (курсив наш. — Л.Т.).

Справка. Термин «ноосфера» был предложен в 1924 году известным французским ученым *Эдуардом Леруа* (1870–1954). Существуют две трактовки этого термина. Первая: ноосфера — это биосфера, находящаяся под воздействием человека. Вторая: ноосфера — это биосфера, развитие которой целенаправленно управляется человеком, обладающим необходимыми знаниями о природе и соответствующими нравственными принципами. Мы придерживаемся здесь второй трактовки, следуя академику В.И. Вернадскому и известному французскому палеонтологу *Пьеру Тейяр-де-Шардену* (1881–1955). В.И. Вернадский писал: «Человечество, взятое в целом, становится мощной геологической силой. Перед его мыслью и трудом ставится вопрос о *перестройке биосферы в интересах свободно мыслящего человечества как единого целого*. Это новое состояние биосферы, к которому мы, не замечая этого, приближаемся, и есть *ноосфера*».

ИНТЕРМЕДИЯ: ДВЕ ИПОСТАСИ СОВРЕМЕННОЙ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ КАРТИНЫ МИРА

...Одна, как страсть любви пылка
И жадно льнет к земле всецело,
Другая вся за облака
Так и рванулась бы из тела...

Гете («Фауст»)

Справка. Ипостась — от греческого *hypostasis*, означающего «сущность, основание».

Читатель. Первоначала материи, конечно, составляют *основу, фундамент* естественнонаучной картины мира. Не обращаясь к атомной физике, ядерной физике и физике элементарных частиц, нельзя представить себе современную картину мира. Это бесспорно. Но картина мира должна давать нам, в конечном счете, представление именно о *мире*, о том, как устроена и как развивается *Вселенная*. Однако, рассматривая в предыдущей теме особенности современной естественнонаучной картины мира, Вы вообще не касались Вселенной. Можно подумать, что в XX столетии процесс научного познания мира шел главным образом «вглубь». А ведь, наверное, это не так.

Автор. Вы совершенно правы. Конечно, это не так. В XX столетии сделаны потрясающие открытия как в области *космогонии* (так называют раздел астрономии, изучающий происхождение и развитие космических тел и их систем), так и в области *космологии* (так называют физическое учение о Вселенной как целом). Разумеется, современную картину мира невозможно представить без учета всех этих открытий астрономического и астрофизического характера. Этим мы теперь и займемся.

Читатель. Может быть, логичнее было бы как раз с этого начинать?

Автор. Тут я с Вами не соглашусь. Открытия современной космогонии и особенно космологии *не могли бы состояться* без создания теории относительности и квантовой теории поля и вещества. Чтобы на уровне понимания, осмысления выйти в просторы космоса, необходимо было сначала углубиться в вещество, исследовать мир микроявлений.

Читатель. Но ведь это два таких разных объекта исследований — явления космических масштабов и микроявления, характеризующие поведение атомов и элементарных частиц! Они должны предполагать совершенно разные методы исследования, должны основываться на разных теориях.

Автор. Оказалось, однако, что между физикой элементарных частиц (которая, образно говоря, «льнет к земле всецело») и астрофизикой (которая «рвется за облака») существует глубокая взаимосвязь — *и в этом проявляется, пожалуй, главная особенность современной естественнонаучной картины мира*. Как заметил выдающийся российский физик-теоретик академик *Евгений Павлович Велихов* (род. 1935 г.), «взаимопроникновение и взаимосвязь физики и космологии хочется выделить особо — это союз, дающий нам совершенно новые силы и возможности миропонимания».

Читатель. Взаимосвязь — это понятно. Без знания физических процессов, происходящих, например, в звездах, нельзя объяснить их рождение и прогнозировать их будущую судьбу. Но о каком «взаимопроникновении» говорил академик Велихов?

Автор. «По мере того, — говорил он. — как астрофизика глубже и детальнее исследует космос, мы получаем возможность проверять в этой гигантской лаборатории свои представления о природе вещей, формировать и развивать фундаментальные физические теории...».

Читатель. Космос как *гигантская физическая лаборатория*?

Автор. Вот именно. А в то же время, используя современные большие ускорители заряженных частиц, на которых достигаются энергии до тераэлектронвольта (10^{12} эВ), мы можем в определенной мере моделировать процессы, происходившие во Вселенной миллиарды лет на-

зад. Е.П. Велихов подчеркивал, что «уже одно то, что сегодня удается воссоздавать процессы, которые шли много миллиардов лет назад и с которых начиналось развитие Вселенной в нынешнее ее состояние, уже один этот факт, если вдуматься, говорит о том, какой могучей силой познания стала нынешняя физика». Яркий пример — проблема массы нейтрино. Если выяснится, что у нейтрино все-таки есть какая-то масса покоя, то отсюда можно будет с уверенностью заключить об эволюции Вселенной по *закрытой модели* (расширение Вселенной должно со временем смениться ее сжатием). Если же у нейтрино нет массы покоя, то эволюцию Вселенной следует, по-видимому, описывать *открытой моделью* (расширение никогда не сменится сжатием). На чашах весов оказались нейтрино и будущее Вселенной!

Приведем отрывок из книги Я.Б. Зельдовича и М.Ю. Хлопова «Драма идей в познании природы»: «Обращаясь вспять по времени, космология заглядывает в такие периоды эволюции Вселенной, когда при высокой плотности энергии вещества и излучения оказываются возможными любые маловероятные процессы превращения элементарных частиц, открываются каналы рождения самых тяжелых частиц. *Процессы, недоступные исследованию в лабораторных установках, но уверенно предсказываемые для частиц сверхвысоких энергий, обретают реальность в далеком прошлом Вселенной*, стоящим перед мысленным взором современной космологии. Космология может проводить мысленные эксперименты, анализировать, к каким следствиям для современной Вселенной приведет осуществление в ее далеком прошлом того или иного физического процесса, предсказываемого теорией и недоступного лабораторному опыту. *Это превращает Вселенную в уникальную лабораторию элементарных частиц*» (курсив наш. — Л.Т.).

Читатель. А можно ли указать общие цели, которые преследуют сегодня столь тесно сотрудничающие друг с другом физики и космологи?

Автор. Они заключаются в отыскании *наиболее общих закономерностей в естественнонаучной картине мира*. Имеются в виду такие суперцели как разработка квантовой теории гравитации, создание теории, объединяющей не только электромагнитное и слабое взаимодействие, но также и сильное взаимодействие, выявление глубинных симметрий, «управляющих» взаимодействиями, которыми обусловлены, в конечном счете, все естественные процессы в нашем мире.

Читатель. Но продвигаясь к общим целям, физики и космологи, надо полагать, применяют различную экспериментальную технику. К тому же и подходы разные. Физики-экспериментаторы на своих установках возбуждают те или иные процессы. Космологи же занимаются астрономическими и астрофизическими наблюдениями.

Автор. Тут, конечно, Вы правы. Физики-экспериментаторы используют большие ускорители заряженных частиц, которые можно сравнить с гигантскими микроскопами, позволяющими зондировать области пространства вплоть до расстояний порядка дебройлевской длины волны ускоренной частицы. Современные ускорители-коллайдеры на встречных пучках подняли энергию частиц до 1 ТэВ (10^{12} эВ). При таких энергиях дебройлевская длина волны оказывается порядка 10^{-16} см. Что же касается возможностей современных космологических исследований, то здесь следует отметить огромные достижения в развитии радиоастрономии, инфракрасной астрономии, рентгеновской и гамма-астрономии. Радиоастрономические наблюдения, как и многие наблюдения в инфракрасной и видимой области спектра проводятся с поверхности Земли. Используются современные радиотелескопы и радиоинтерферометры. Рентгеновскую, ультразвуковую и гамма-астрономию относят к *внеатмосферной астрономии*, использующей орбитальные и межпланетные станции-обсерватории. Эти станции выполняют наблюдения также в оптическом (видимом) диапазоне электромагнитного излучения.

Справка. В 1990 году с борта американского корабля многоразового использования «Дискавери» была выведена на орбиту крупнейшая околоземная обсерватория — *Хаббловский космический телескоп* весом более 12 т. В 1997 году на этой обсерватории был установлен спектрограф высокого разрешения и новая ИК-камера, с помощью которой планируется начать поиск планетных систем у ближайших звезд. Заметим, что хаббловский телескоп дал веские свидетельства существования черных дыр в ядрах ряда галактик.



СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВСЕЛЕННОЙ: РОЖДЕНИЕ И СМЕРТЬ

Поэты утверждают, что наука лишает звезды красоты. Для нее звезды — просто газовые шары. Совсем не просто. Я тоже люблю звезды и чувствую их красоту. Вот только кто из нас видит больше?

Ричард Фейнман

В физике сосуществуют две универсалии: теплота и гравитация. Более того, эти две универсалии — антагонисты.

Илья Пригожин

Все тяжелые элементы образовались в результате взаимодействия ядер более легких элементов и элементарных частиц при взрывах массивных звезд. Не здесь ли кроется разгадка извечной тяги человечества к звездам? Ведь в мельчайшей клеточке живой материи есть атомы железа, синтезированные при гибели какой-нибудь массивной звезды.

К. Постнов (Энциклопедия для детей: Астрономия. М.: «Аванта плюс», 2000)

14.1 ЗВЕЗДНОЕ НЕБО

При взгляде на звездное небо ясной ночью мы видим великое множество светящихся точек, как относительно ярких, так и едва заметных. Рассматривая небо в телескоп, мы убеждаемся, что количество различных светящихся точек существенно возросло. К тому же можно наблюдать размытые светлые пятна, к которым неплохо подходит название «туманности».

Еще в начале XX столетия астрономы полагали, что за вычетом весьма небольшого числа планет и наблюдаемых на небосводе комет все светящиеся точки — это звезды. Двадцатый век заставил пересмотреть эту точку зрения.

Оказалось, что лишь часть светящихся точек являются звездами. Они принадлежат нашей Галактике, наблюдаемой на звездном небе в виде так называемого *Млечного Пути*. По современным представлениям в Галактике более 100 миллиардов звезд, причем лишь 0,004% этих звезд занесены в каталоги, а остальные пока безымянны и даже толком не сосчитаны. И это, повторяем, всего лишь часть наблюдаемых в телескопы светящихся точек. А остальная часть — это вовсе не звезды, а весьма и весьма удаленные от нас *скопления звезд*. Иначе говоря, это — *другие галактики*. Их существенно больше, чем звезд в нашей Галактике, так что правильнее было бы говорить не о «звездном небе», а о «звездно-галактическом небе». Заметим, что нашу Галактику принято писать с заглавной буквы, тогда как все остальные галактики пишутся с прописной.

Сегодня известно, что наша Галактика — это галактика спирального типа. Наиболее плотная (наиболее заселенная звездами) область Галактики имеет форму двояковыпуклой линзы диаметром около 25 000 пк и толщиной в центральной части около 3000 пк. Астрономическая единица длины *парсек* (обозначается пк) составляет $3,1 \cdot 10^{16}$ м — это есть расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом в одну угловую секунду («парсек» — сокращение от слов «параллакс» и «секунда»). Другая астрономическая единица — *световой год* — равна расстоянию, которое свет преодолевает за год. Световой год составляет 0,3 пк (он примерно в три раза меньше парсека).

Солнечная система находится на расстоянии около 10 000 пк от центра Галактики и движется со скоростью 250 км/с по практически круговой орбите, лежащей в плоскости Галактики. Все звезды Галактики обращаются вокруг ее центра. Солнце совершает полный оборот по галактической орбите за 250 миллионов лет. Положение Солнечной

системы в Галактике определил в 30-х годах прошлого столетия американский астроном *Харлоу Шепли* (1885–1972), за что был прозван «Коперником XX века».

Выдающийся американский астроном *Эдвин Пауэлл Хаббл* (1889–1953) пришел в начале 20-х годов к заключению, что кроме нашей Галактики (Млечного Пути) существует также множество других галактик. В 1925 году он предложил классификацию галактик, разделив их по внешнему виду на три класса: *эллиптические*, *спиральные* и *неправильные*. Такой вид галактики имеют при наблюдении с помощью телескопа. А невооруженному глазу они представляются, как правило, маленькими светящимися пятнышками.

Одно из таких «пятнышек» в созвездии Андромеды Хаббл пристально исследовал и установил, что это есть галактика спирального типа. Ее назвали *Туманностью Андромеды*. На рисунке 1 в таблице 33 дана фотография этой галактики. Расстояние до нее составляет около 700 000 пк (более двух миллионов световых лет!). Она похожа на нашу Галактику, но примерно вдвое превосходит ее по размерам и по общей массе.

На рисунке 2 в таблице 33 представлена фотография галактики, называемой *Большое Магелланово Облако*. Это одна из ближайших к нам галактик; расстояние до нее составляет 50 000 пк. Она относится к неправильным галактикам (по классификации Хаббла).

Распределены галактики в пространстве Вселенной неравномерно и, в свою очередь, образуют сложные системы. Небольшие галактики оканчиваются, как правило, «спутниками» более крупных и все вместе образуют так называемые *местные группы галактик*. Так, наша Галактика и галактики Большое и Малое Магеллановы Облака входят в одну и ту же местную группу галактик. Встречаются группы, в которых галактики соприкасаются или даже частично проникают друг в друга. Форма галактик при этом искажается; возникают межгалактические «перемычки», появляются «хвосты» и протяженные облака из разреженных звезд. Такие галактики называют *взаимодействующими*. Их открыл и впервые исследовал известный российский астроном *Борис Александрович Воронцов-Вельяминов* (род. 1904 г.).

Несмотря на неравномерность распределения галактик в пространстве Вселенной, принято считать Вселенную *однородной* в больших масштабах. Такой она становится, начиная примерно со 100 Мпк (100 млн пк). Это надо понимать так. Выделим мысленно в разных областях пространства объемы в виде куба с ребром в 100 Мпк каждый. Если подсчитать числа галактик, попавших в разные кубы, то окажется, что с большой точностью эти числа совпадают. Совпадения определенно

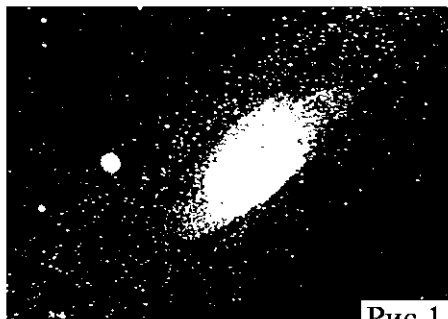


Рис.1

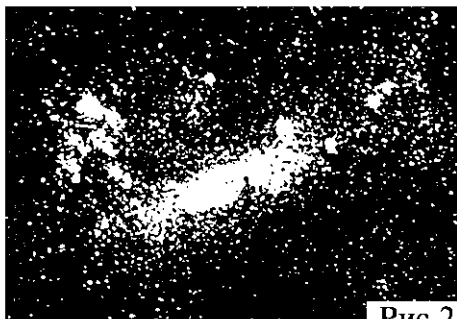


Рис.2

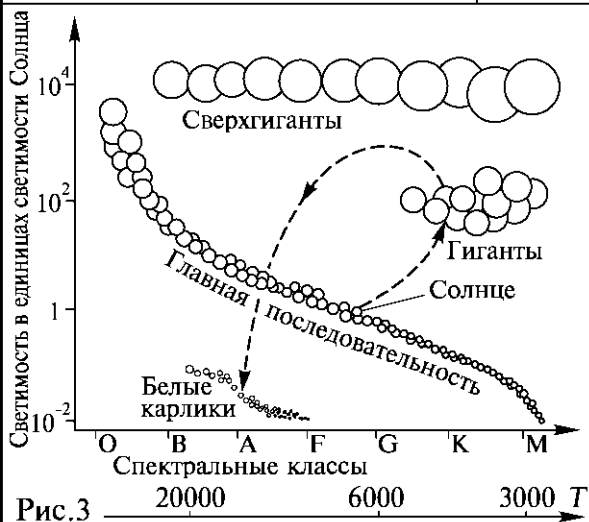


Рис.3

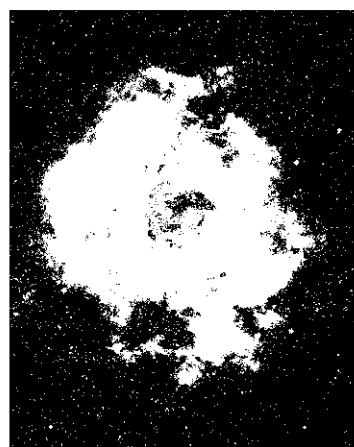


Рис.4

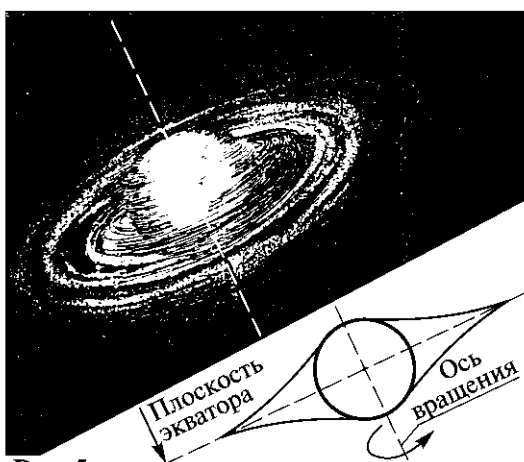


Рис.5

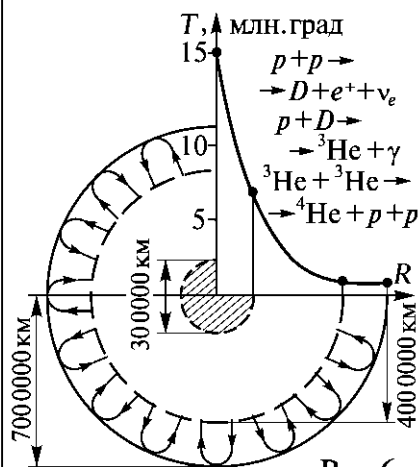


Рис.6

не наблюдалось бы, если рассматривать кубы с ребром, скажем, всего 100 пк или того меньше. Отметим также, что в больших масштабах Вселенная не только однородна, но и *изотропна*, т. е. не обнаруживает физически выделенного направления.

Но вернемся в нашу Галактику (которая, разумеется, не может считаться ни однородной, ни изотропной — ведь ее масштаб измеряется не мегапарсеками, а килопарсеками). На рисунке 3 в таблице 33 представлена знаменитая *диаграмма Герцшпрунга–Рессела*. Она названа по имени построивших ее астрономов — датчанина *Эйнара Герцшпрунга* (1873–1967) и англичанина *Генри Норриса Рессела* (1877–1957). На диаграмме дана зависимость между светимостью звезды и ее спектральным классом (или, иначе говоря, температурой поверхности звезды). На рисунке качественно учтены размеры звезды. Подавляющее большинство (90%) звезд Галактики распределены вдоль так называемой *Главной последовательности* — от ярко светящихся голубых звезд-гигантов до слабо светящихся красных звезд-карликов. На этой последовательности находится и наше Солнце.

В заключение обратимся к рисунку 4 в таблице 33. На нем дана фотография туманности в созвездии Единорога. Отметим, что это не галактика (не скопление звезд), а так называемая *газовая туманность*. Иными словами, это светящийся межзвездный газ, состоящий в основном из *водорода*. Существуют также *пылевые туманности* (они состоят из пылинок размером порядка 0,00001 см) и либо светятся отраженным светом ближайших звезд, либо выглядят темными пятнами на фоне звездного неба. Заметим, что именно межзвездная пыль закрывает от нас центральную область (ядро) нашей Галактики. Если бы этого не было, то на нашем небе между созвездиями Стрельца и Скорпиона сияло бы огромное светлое пятно, не уступающее по яркости лунному диску.

14.2 РОЖДЕНИЕ ЗВЕЗДЫ

Каждая звезда когда-то рождается, затем относительно долгое время (зависящее в основном от массы звезды) спокойно эволюционирует, а потом гибнет. *Все время во Вселенной рождаются новые звезды, а старые звезды погибают.* Одну из первых теорий эволюции звезд создал Геири Ресселл. Но особенно значительный вклад в исследования физики звезд и их эволюции внес известный английский астроном *Артур Стэнли Эддингтон* (1882–1944), автор широко известной монографии «Внутреннее строение звезд» (1926).

Вопрос о том, как образуются звезды, окончательно не решен. Принято считать, что процесс звездообразования происходит наиболее активно в массивных водородных облаках (газовых туманностях). Вроде той, что была представлена на рисунке 4 в таблице 33. Там можно разглядеть множество мелких черных глобул — их следует рассматривать в качестве «зародышей» будущих звезд. В нашей Галактике наиболее активно звездообразование происходит, по-видимому, в *Большой туманности Ориона* — самой яркой газовой туманности на звездном небе.

Рассмотрим в общих чертах сценарий рождения звезды. Ее «зародышем» является *случайно* возникшее уплотнение (сгущение) в каком-либо месте водородного облака. Возникнув, это сгущение начнет постепенно увеличиваться за счет *аккреции* — падения новых порций вещества облака на сгущение под действием сил тяготения. При этом будет происходить высвобождение *гравитационной энергии*, приводящее к разогреванию сгущения. Образовавшееся сгущение начинает *вращаться* (вначале это было вращение частей сгущения вокруг общего центра масс; со временем центр масс постепенно переместился внутрь наиболее массивной и продолжающей набирать массу части сгущения). В центре вращающегося сгущения формируется *довольно плотное шарообразное ядро*, окруженное более разреженными частями облака, которые будут группироваться в основном вблизи плоскости экватора сгущения, поскольку именно там сильнее проявляется центробежный эффект. Он вызван вращением сгущения и в какой-то мере противодействует гравитационному сжатию.

Плотное ядро в центре сгущения продолжает нагреваться (в процессе продолжающейся аккреции) и в конце концов превращается в светящийся шар. Но это еще не звезда. Нагревание и свечение вызваны сжатием вещества облака. Это пока только так называемая *протозвезда* — горячий и светящийся водородный шар, окруженный холодными разреженными «остатками» облака, собравшимися в основном в экваториальной плоскости и вращающимися вместе с шаром. Соответствующая картина схематически изображена на рисунке 5 в таблице 33.

При рассмотрении ядра протозвезды возникает вопрос: до каких пор будет продолжаться его сжатие? И вот тут в игру включается новый фактор: при достаточно высоких температурах (порядка десятка миллионов градусов), обусловленных достаточно сильным сжатием протозвезды, в ее водородных недрах начинается ядерная реакция — *превращение водорода в гелий с освобождением исключительно огромных количеств энергии*. Благодаря высвобождению энергии растет давление газа в глубинах протозвезды (точнее, давление плазмы). Этот рост будет продолжаться

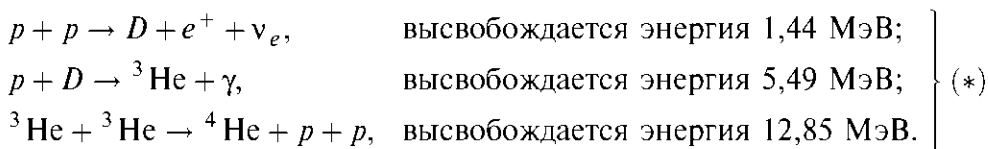
до тех пор, пока силы внутреннего давления, стремящиеся взорвать протозвезду, не уравновесятся силами гравитации, стремящимися, напротив, еще больше ее сжать. Как только наступит равновесие, начнется длительный период относительно стабильного существования звезды. Можно сказать, что, наконец, из протозвезды сформировалась звезда.

Если звезда относительно невелика (типа нашего Солнца), рассмотренный выше процесс формирования протозвезды и превращения ее в звезду занимает в целом около 50 миллионов лет. У массивных звезд с массой в десять и более раз большей массы Солнца этот процесс протекает существенно быстрее и может уложиться в миллион лет.

14.3 ЖИЗНЬ ЗВЕЗДЫ

Жизнь звезды рассмотрим на примере нашего Солнца. Заметим, что еще в 1920 году Артур Эддингтон предположил, что возможным источником энергии звезд и в частности Солнца является реакция превращения водорода в гелий. Он оказался прав.

Сегодня известно, что в недрах Солнца (точнее сказать, в центральной области Солнца, называемой ядром) протекают следующие реакции, сопровождающиеся высвобождением огромной энергии:



Эти реакции имеют достаточно высокую вероятность лишь при температурах порядка 10 миллионов градусов и выше, их называют *термоядерными реакциями*.

Итак, из четырех атомов водорода (точнее, четырех протонов) в результате указанной цепочки превращений образуется один атом гелия (точнее, α -частица). Подсчитано, что в солнечном ядре каждую секунду 5640 миллионов тонн водорода превращаются в 5600 миллионов тонн гелия. Разница в 40 миллионов тонн — это высвобождающаяся в соответствии с известной формулой $E = mc^2$ энергия, которую уносят с собой испускаемые Солнцем фотоны, нейтрино, а также электроны и протоны, образующие солнечный ветер.

Установлено, что Солнце функционирует достаточно стабильно вот уже 5 млрд. лет и, по-видимому, еще 5 млрд. лет будет функционировать,

оставаясь шаром диаметром 1 400 000 км с температурой ядра около 10 млн град и давлением плазмы в ядре в сотни миллиардов атмосфер. Весьма длительная стабильность Солнца связана прежде всего с относительно невысокой скоростью процесса, приводящего к «выгоранию» водорода и превращению его в гелий. Заметим, что в настоящее время на долю водорода приходится 71% массы Солнца, на долю гелия — 27%; оставшиеся 2% приходятся на более тяжелые элементы: углерод, азот, кислород и др. Принципиальное значение для стабильности Солнца (как, впрочем, и любой звезды) имеет устойчивый характер равновесия между сжимающими Солнце силами гравитации и стремящимися взорвать Солнце силами внутреннего давления. Устойчивости равновесия грозят накопление в недрах Солнца непрерывно высвобождающейся в термоядерных реакциях энергии. Поэтому весьма важен механизм *отвода высвобождающейся энергии*, переноса ее к поверхности светила и выбрасывания в космическое пространство. Чтобы понять этот механизм (точнее, механизмы), нужно познакомиться с внутренним строением Солнца.

Строение Солнца схематически показано на рисунке 6 в таблице 33. В центре находится *ядро* диаметром 300 000 км (оно на рисунке заштриховано). Вокруг ядра располагается так называемая *лучистая (радиационная) зона*; она занимает шаровой слой толщиной 400 000 км. Вокруг радиационной зоны располагается так называемая *конвективная зона* (шаровой слой толщиной 150 000 км). Далее начинается *солнечная атмосфера*. Она состоит из трех областей. Самая нижняя представляет собой слой *фотосферы* высотой всего 300 км. Именно фотосферу мы видим, когда глядим на солнечный диск. Выше фотосферы, до высот порядка 10 000 км располагается *хромосфера* — область, где рождаются солнечные протуберанцы. Еще дальше — до расстояний в несколько диаметров Солнца — простирается *солнечная корона*.

Температура плазмы внутри солнечного ядра повышается при приближении к центру светила от 7 до 15 млн град (см. график $T(R)$ на рисунке 6). Плотность плазмы в ядре равна 150 г/см³, т. е. в 150 раз больше, чем у воды. По мере подъема от ядра к поверхности Солнца температура падает, опускаясь до примерно 6000 К в фотосфере. При этом уменьшается также плотность солнечной плазмы. Заметим, что средняя плотность Солнца составляет всего 1,5 г/см³, что примерно в четыре раза меньше средней плотности земного шара. Любопытно, что по мере подъема над поверхностью Солнца температура солнечного вещества начинает расти. Уже на высоте 100 км она составляет 20 000 К, а на высоте 5000 км достигает миллиона градусов. В нижних областях сол-

нечной короны температура измеряется миллионами градусов; корона оказывается в сотни и тысячи раз более горячей по сравнению с поверхностью Солнца.

Теперь рассмотрим механизмы отвода высвобождающейся в солнечном ядре гигантской энергии. Родившиеся внутри ядра нейтрино весьма легко покидают солнечные недра — для нейтрино Солнце практически прозрачно. Вместе с нейтрино покидает Солнце и определенная часть высвободившейся внутри него энергии. Но вот фотоны с большим трудом «пробиваются» сквозь радиационную зону: вещество зоны активно поглощает фотоны и столь же активно испускает их, причем в произвольных направлениях, так что в результате фотонам приходится как бы «блуждать» внутри радиационной зоны. Ситуацию спасает конвективная зона, благодаря которой в процесс переноса энергии от недр Солнца к его поверхности включается вещество, вовлекаемое в *конвекцию*. Потоки сильно нагретой плазмы движутся от радиационной зоны к поверхности Солнца. Там они заметно охлаждаются (освободившись от избытка энергии) и устремляются вглубь Солнца за новыми количествами энергии. Заметим, что благодаря конвекции плазмы как раз и возникает наблюдаемая астрономами сетка мелких гранул на поверхности Солнца, напоминающая кипящую рисовую кашу.

Попробуем теперь понять, почему так сильно разогреваются хромосфера и нижние области солнечной короны. Конечно, излучение, испускаемое фотосферой, греет хромосферу и корону. Но этого недостаточно. Как показал известный российский астрофизик академик *Андрей Борисович Северный* (1913–1987), поверхность Солнца все время как бы «дышит» или, лучше сказать, *пульсирует* (с периодом в 160 минут): огромные участки солнечной поверхности, достигающие в поперечнике ста тысяч километров, то поднимаются на десятки километров, то опускаются. Это напоминает мехи гигантского органа. Можно сказать, что Солнце мощно ревет, воеет, кричит, порождая вблизи поверхности *мощные звуковые волны*. Они-то и разогревают столь сильно хромосферу и корону. Тем самым Солнце как бы «стряхивает» с себя высокоэнергетичные частицы и усиливает выброс энергии в космическое пространство. Ведь чем выше температура плазмы солнечной короны, тем быстрее движутся ее частицы и, значит, тем скорее (и тем дальше) они могут удалиться от поверхности Солнца.

Получается, что наше такое стабильное Солнце — в действительности *довольно беспокойный космический объект*. Его активность проявляется в бурных движениях, происходящих в конвективной зоне, фотосфере и хромосфере. Потоки плазмы перемешиваются, завихряются, участвуют

в мощных колебательных процессах. Солнце буквально бурлит, волнуется, ревет. И щедро посылает в межпланетное пространство потоки излучений и плазмы, освобождаясь тем самым от излишков энергии.

14.4 ЗАВЕРШЕНИЕ ЖИЗНИ ЗВЕЗДЫ

14.4.1. Судьба малых звезд; белые карлики. Массы звезд распределены в пределах от нескольких десятков до одной десятой солнечной массы. При меньших массах гравитационное сжатие оказывается недостаточным для того, чтобы поднять температуру до значений, при которых начинается превращение водорода в гелий. Обратим внимание на то, что по массе звезды различаются не более, чем в несколько сот раз. В то же время по размерам они различаются в десятки и сотни тысяч раз, а по светимости в миллиарды раз.

Рассмотрим в общих чертах, как завершается жизнь *малых* звезд, т. е. звезд, масса которых не превышает массы Солнца. Тем самым мы познакомимся с тем, какая судьба ожидает наше собственное светило.

Примерно через 5 млрд. лет процессы превращения водорода в гелий заметно ослабеют. И дело тут не только в том, что не будет хватать водорода (его запасы будут пока еще значительны), а в том, что накопившийся к тому времени гелий начнет подавлять процессы термоядерного синтеза. Вроде того, как накапливающаяся в камине зола начинает мешать горению дров.

С ослаблением процессов превращения водорода в гелий уменьшится высвобождение энергии, понизится температура ядра Солнца и снизится давление плазмы в ядре. Снижение давления приведет к нарушению равновесия — силы гравитации, сжимающие Солнце, начнут превалировать над силами внутреннего давления, и звезда станет сжиматься. Это сжатие приведет, в свою очередь, к тому, что температура не только перестанет снижаться, но напротив, повысится и притом весьма и весьма значительно — примерно до 100 миллионов градусов. При столь высоких температурах начнутся новые термоядерные процессы с высвобождением больших количеств энергии: *гелий начнет превращаться в углерод.*

Этот процесс называют *тройным альфа-процессом*. Сначала две α -частицы при столкновении образуют на короткое время неустойчивый изотоп бериллия: ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$. Если, прежде чем он распадется на α -частицы, с ним столкнется еще одна α -частица, то может образоваться стабильный изотоп углерода.

Одновременно вновь усилятся процессы превращения водорода в гелий (ведь золу из камина стали выгребать). Благодаря тому, что высвобождение энергии усилилось, начнут превалировать силы внутреннего давления над силами гравитации — и Солнце будет довольно быстро расширяться, увеличиваясь в объеме. Раньше оно имело диаметр около полутора миллионов километров. Теперь его диаметр увеличится примерно в сто раз. Поверхность Солнца окажется за пределами орбит Меркурия и Венеры, достанет орбиту Земли. При столь огромных размерах светила площадь его поверхности окажется в 10 000 раз больше, чем раньше, — и тогда станет неизбежным снижение ее температуры. Теперь постороннему наблюдателю (если таковой где-то будет присутствовать) поверхность Солнца должна представляться не желтой, а красной, а затем темно-красной. *Желтая малая звезда превратилась в красного гиганта.*

В облике красного гиганта Солнце просуществует еще примерно 50–100 миллионов лет. За это время температура его недр существенно понизится; там прекратятся превращения не только гелия в углерод, но и водорода в гелий. И тогда произойдет *гравитационный коллапс*: силы гравитации заставят звезду сжаться. Она превратится в так называемый *белый карлик*.

Белые карлики — весьма необыкновенные космические объекты; имея массу, равную массе малой звезды, они в то же время характеризуются диаметром всего лишь около 10 000 км (это близко к диаметру земного шара). Плотность их вещества (а это в основном гелий) весьма высока — порядка 1 т/см^3 . Температура внутри белого карлика не превышает 10 000 К. При таких температурах и такой плотности он, по сути дела, является *горячим кристаллом*, имеет плотно упакованную пространственную решетку из атомных ядер, сквозь которую распространяются электроны (все они обобществлены кристаллом).

Легко подсчитать, что ускорение силы тяжести на поверхности белого карлика составляет $10^5\text{--}10^6 \text{ м/с}^2$, т. е. в десять-сто тысяч раз больше, чем на Земле. Что же уравнивает гигантские силы гравитации, обеспечивая стабильность белых карликов? Оказывается, что силам гравитации противостоят в данном случае силы давления электронного газа, заполняющего ядерную пространственную решетку. Дело в том, что в белом карлике газ электронов является, как принято говорить, *вырожденным*: его давление *не зависит от температуры тела* и остается очень высоким, даже если тело остынет до абсолютного нуля! Это есть одно из следствий *фермионности* электронов, которая вынуждает их подчиняться квантовомеханическому *принципу Паули*, запрещающему

электрону занимать состояние, уже занятое другим электроном. Итак, стабильность белых карликов объясняется тем, что *силам гравитации противостоят силы давления вырожденного электронного газа* (их называют также силами отталкивания, обусловленными принципом Паули).

В книге известного английского физика-теоретика и астрофизика *Стивена Хокинга* (род. 1941 г.) «От Большого Взрыва до черных дыр: краткая история времени» стабильность белых карликов объясняется так: «Когда звезда уменьшилась, частицы вещества очень сильно сблизилась друг с другом и в силу принципа запрета Паули их скорости должны все больше различаться. Следовательно, частицы стремятся разойтись, и звезда расширяется. Таким образом, радиус звезды может удерживаться постоянным благодаря равновесию между гравитационным притяжением и возникающим в силу принципа Паули отталкиванием, точно-точно как на более ранней стадии развития звезды гравитационные силы уравновешивались ее тепловым расширением... Однако отталкивание, обусловленное принципом Паули, не беспредельно. Чандрасекар рассчитал, что если масса холодной звезды более чем в полтора раза превышает массу Солнца, то эта звезда не сможет противостоять собственной гравитации...»

В приведенном отрывке Хокинг упоминает известного индийского астрофизика *Субрахманьяна Чандрасекара* (1910–1995), который в 30-х годах прошлого столетия установил на основе квантовомеханических вычислений, что для стабильности белого карлика необходимо, чтобы его масса не превышала $1,4 \cdot m_c$, где m_c — масса Солнца. Значение $1,4 \cdot m_c$ называют ныне *пределом Чандрасекара*.

14.4.2. Судьба массивных звезд; вспышки Сверхновых. К массивным звездам относят звезды, масса которых в два раза и более превышает массу Солнца. Существенно, что в массивной звезде все процессы протекают *много быстрее*, чем в звездах типа Солнца. В этих случаях протозвезда всего через миллион лет превращается в звезду, которая стабильно функционирует всего около десяти миллионов лет, после чего превращается в красный гигант. Тот существует порядка миллиона лет и погибает при грандиозном взрыве, который астрономы регистрируют как вспышку *Сверхновой*. Интенсивно протекающие внутри массивных звезд процессы приводят, в конечном счете, к тому, что давление плазмы в недрах звезды попросту взрывает звезду. Здесь силы давления торжествуют убедительную победу над силами гравитации.

Какова физика процессов, приводящих к вспышке Сверхновой? Преобладает точка зрения, согласно которой резкое повышение давления внутри массивной звезды, находящейся в стадии красного гиганта, связано с *нейтрино высоких энергий*. Эти нейтрино на какое-то время оказались как бы «запертыми» внутри звезды силами гравитации, в результате чего возникают *мощные нейтринные конвективные движения*. Они-то

и сообщают в конечном счете мощный импульс внешней оболочке красного гиганта, который и приводит к взрыву.

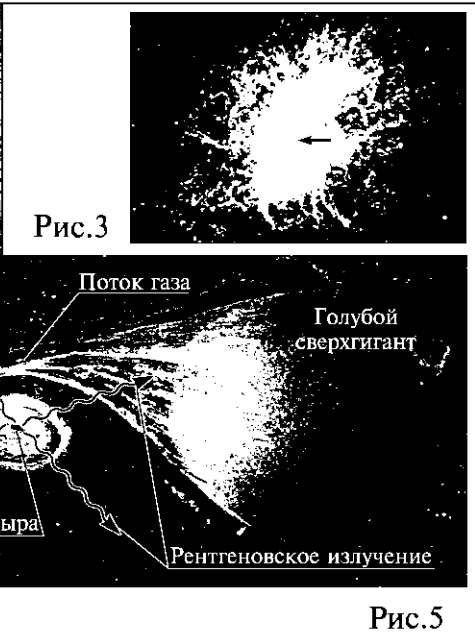
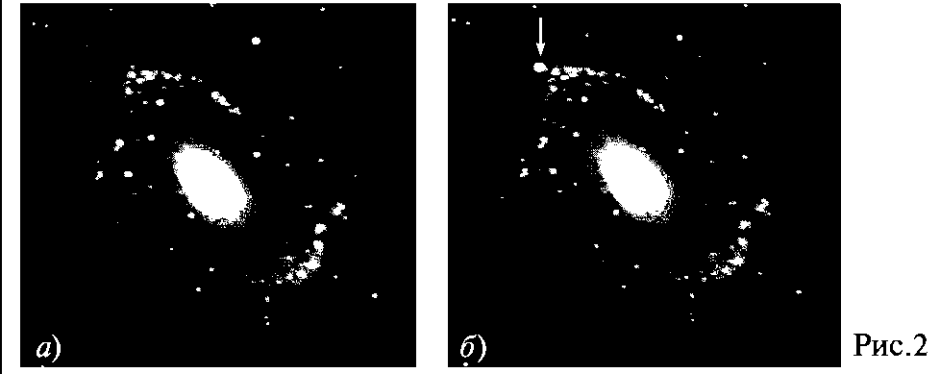
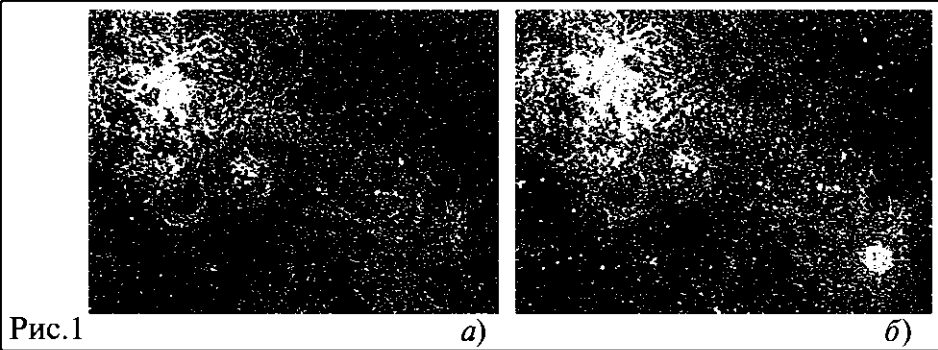
В феврале 1987 года астрономы зарегистрировали хорошо наблюдаемую вспышку Сверхновой в Большом Магеллановом Облаке; одновременно был зарегистрирован нейтринный импульс. Этот взрыв (настоящая катастрофа в звездном мире) произошел в действительности примерно 150 000 лет назад, поскольку расстояние от Земли до места взрыва равно 50 000 пк. На рисунке 1е в таблице 34 приведена фотография участка Большого Магелланова Облака, сделанная до 1987 года, а на рисунке 1б — фотография того же участка неба со вспышкой Сверхновой. Сверхновая хорошо видна на фотографии. Ее можно было наблюдать даже невооруженным глазом.

Еще одну вспышку Сверхновой демонстрирует рисунок 2 в таблице 34. Взрыв произошел в созвездии Волосы Вероники и вспышка Сверхновой была зарегистрирована в мае 1940 года. На рисунке 2а приведена фотография соответствующего участка неба до взрыва. На рисунке 2б видна вспышка Сверхновой; она отмечена стрелкой.

Взрыв, рождающий вспышку Сверхновой, может завершиться полным разлетом вещества (со скоростями, достигающими десятков тысяч километров в секунду), но может оставить после себя облако (туманность) и весьма компактный остаток в виде нейтронной звезды или черной дыры. Наблюдаемая сегодня в нашей Галактике в созвездии Тельца (на расстоянии 2000 пк от Солнечной системы) *Крабовидная Туманность* представляет собой остатки Сверхновой, вспышка которой была зарегистрирована в 1054 году китайскими и японскими астрономами. Современный вид этой туманности в телескопе представлен на рисунке 3 в таблице 34. В 1953 году известный советский радиоастроном *Иосиф Самуилович Шкловский* (1916–1985) исследовал спектр Крабовидной Туманности и объяснил ее свечение испусканием излучения электронами, движущимися почти со скоростью света в слабом магнитном поле (такое излучение называют *синхротронным*).

Говоря о последствиях взрывов, порождающих вспышки Сверхновых, отметим, что энергия разлетающегося при взрыве вещества частично поглощается межзвездным газом и обуславливает его движения. Отметим также, что в разлетающемся веществе содержится богатый набор химических элементов, синтезированных в звезде при термоядерных превращениях водорода и гелия в более тяжелые элементы. Без преувеличения можно сказать, что живое вещество Земли существует благодаря, в частности, взрывам Сверхновых, снабжающих галактики (в том числе и нашу Галактику) тяжелыми химическими элементами.

Таблица 34. Завершение жизни звезд



14.5 НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ (ПУЛЬСАРЫ)

В приведенном в 14.4.1 отрывке из книги Хокинга отмечалось, что «отталкивание, обусловленное принципом Паули, не беспредельно». Если масса звезды превышает предел Чандрасекара (т. е. больше полутора масс Солнца), то звезда не может противостоять собственной гравитации и будет продолжать сжиматься до тех пор, пока не превратится в нейтронную звезду.

Нейтронная звезда образуется в результате *процесса нейтронизации*:



Этот процесс происходит в состоянии сверхвысокой плотности вещества, возникающем при *гравитационном коллапсе крупной звезды* после выгорания ядерного горючего. При очень высокой плотности вещества электроны как бы «вдавливаются» в протоны, или, правильнее сказать, происходит превращение протона и электрона в нейтрон и электронное нейтрино. Нейтронная звезда состоит в основном из нейтронов и имеет *чудовищно огромную плотность*, во много раз превышающую плотность белых карликов. Она может достигать $100\,000\,000\text{ т/см}^3$. Представьте себе, что вся масса Солнца сосредоточилась в нейтронной звезде — шаре диаметром всего лишь 10–20 км! На рисунке 4 в таблице 33 для большей наглядности силуэт нейтронной звезды представлен на карте Москвы.

Стабильность нейтронных звезд объясняется тем, что сверхмощным силам гравитации в них противостоит опять-таки «отталкивание, обусловленное принципом Паули», но только теперь это «отталкивание» связано с фермионностью не электронов, а нейтронов. Возможность существования нейтронных звезд предсказал еще в 1932 году выдающийся советский физик-теоретик академик *Лев Давидович Ландау* (1908–1968), а в 1934 году швейцарский астроном *Фриц Цвикки* (1898–1974) и немецкий астроном *Вальтер Бааде* (1893–1960) выдвинули предположение, что нейтронные звезды могут возникать в качестве компактных остатков взрывов Сверхновых. Предположение Цвикки–Бааде подтвердилось через тридцать лет, когда в 1967 году английский радиоастроном *Энтони Хьюиш* (род. 1924 г.) открыл пульсары. (Справедливости ради заметим, что первый пульсар обнаружила работавшая с радиотелескопом *Джослин Бэлл*, аспирантка профессора Хьюиша, но все лавры, в том числе Нобелевская премия, достались Хьюишу).

Пульсары — источники космического электромагнитного излучения в виде *исключительно регулярно повторяющихся импульсов*, как правило, в

радиодиапазоне от метровых до сантиметровых волн. Периоды повторения импульсов у известных радиопульсаров лежат в пределах от 0,001 с до 4 с. Строгая повторяемость импульсов пульсаров позволяла поначалу надеяться, что мы регистрируем сигналы, подаваемые какой-то далекой цивилизацией. Но оказалось, что пульсары представляют собой *быстровращающиеся нейтронные звезды*, которые испускают узконаправленное излучение. Нейтронная звезда вращается — и пучок излучения попадает в поле зрения наблюдателя через промежутки времени, равные периоду вращения звезды. В результате наблюдатель регистрирует строго повторяющиеся через один и тот же промежуток времени импульсы излучения. Само же излучение пульсара вовсе не пульсирует, так что термин «пульсар» не является удачным. Пульсары не пульсируют — они вращаются.

Заметим в заключение, что стрелкой на рисунке 3 в таблице 34 показано то место в Крабовидной Туманности, откуда идут радиоимпульсы. Именно в этом месте находится пульсар, т. е. иными словами, нейтронная звезда, оставшаяся после взрыва Сверхновой, зарегистрированного в 1054 году. Открытие пульсара в Крабовидной Туманности послужило доказательством существования нейтронных звезд, возникающих как результат «взрыва внутрь» при вспышке Сверхновой. «Взрыв внутрь» образовал сверхплотное компактное тело (нейтронную звезду, обнаруживающую себя в качестве пульсара), а «взрыв наружу» образовал свещающуюся Крабовидную Туманность.

14.6 ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ — САМЫЕ УДИВИТЕЛЬНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Термин «черная дыра» был введен в науку в 1968 году американским физиком-теоретиком *Джоном Арчибалдом Уилером* (род. 1911 г.) для обозначения космических объектов, образующихся в результате гравитационного коллапса массивных звезд. Если масса звезды не превышает $1,4 \cdot m_c$ (m_c — масса Солнца), то, как мы уже говорили, в результате гравитационного коллапса возникает белый карлик, стабильность которого обеспечивается равновесием между силами гравитации и силами давления вырожденного электронного газа. Если масса звезды больше $1,4 \cdot m_c$, но не превосходит примерно $3 \cdot m_c$, гравитационный коллапс завершается возникновением нейтронной звезды: ее стабильность обеспечивается равновесием между силами гравитации и силами

давления вырожденного нейтронного «газа». Если же масса звезды заметно больше $3 \cdot m_c$, то гравитационный коллапс не прекращается с образованием нейтронной звезды, а продолжается, приводя к возникновению *черной дыры*.

Поле тяготения в черной дыре оказывается настолько большим, что не выпускает наружу ни свет, ни какое-либо другое излучение. Поэтому термин «черная дыра» можно считать весьма удачным. Надо только иметь в виду, что речь идет не о каком-то отверстии в некоей поверхности, а об объеме (точнее сказать, космическом объекте), обладающем удивительным свойством, которое можно назвать *гравитационным самозамыканием*, — черная дыра втягивает внутрь себя оказавшееся поблизости вещество и излучение и не выпускает наружу.

Радиус R_0 объема черной дыры определил в 1916 году немецкий астроном *Карл Шварцшильд* (1873–1916), исследовавший на основе общей теории относительности поведение света в сильном поле тяготения. Он показал, что тяготение становится бесконечно большим, когда тело массой M сжимается в шар радиуса

$$R_0 = 2GM/c^2, \quad (*)$$

где G — гравитационная постоянная ($G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$), c — скорость света. Величину R_0 называют *гравитационным радиусом* (или *радиусом Шварцшильда*). Для Солнца гравитационный радиус равен примерно 3 км (масса Солнца $2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$), а для Земли — 9 мм (масса Земли $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$). Солнце можно было бы, в принципе, превратить в черную дыру, если сжать его в шарик радиусом 3 км. Чтобы превратить в черную дыру земной шар, его надо сжать в шарик радиусом 9 мм.

Вблизи черной дыры необходимо учитывать взаимосвязь не только времени и пространства, но также взаимосвязь пространства-времени и поля тяготения — в полном соответствии с выводами общей теории относительности Альберта Эйнштейна. Здесь *пространство–время сильно искажено чудовищно огромным тяготением*. Весьма существенно, что в столь сильном поле тяготения *время замедляется*. Приведем отрывок из книги *И.Д. Новикова «Как взорвалась Вселенная»* (М.: «Наука», 1988):

«Развитие общей теории относительности в последние десятилетия привело к подлинно революционным изменениям наших представлений о времени. Это в первую очередь связано с изучением свойств черных дыр. Черные дыры представляют собой удивительный сгусток гравитации. Они возникают при катастрофическом сжатии массивных звезд в конце их эволюции. При этом гравитационное поле возрастает настолько, что не выпускает даже свет. Ту область, из которой не

может выйти свет, и называют черной дырой. *С точки зрения далекого наблюдателя, чем ближе к черной дыре, тем медленнее течет время. На границе черной дыры его бег и вовсе замирает.* Совсем иная картина представляется наблюдателю, который на космическом корабле отправляется в черную дыру... По часам падающего в дыру наблюдателя, или по его пульсу, до пересечения границы черной дыры протекло какое-то конечное число секунд. Бесконечно долгое падение корабля по часам далекого наблюдателя уместилось в очень короткое время падающего в дыру наблюдателя. Бесконечное для одного стало конечным для другого. Вот поистине фантастическое изменение представлений о течении времени.

Наблюдатель, упавший в черную дыру, никогда не сможет оттуда выбраться, как бы ни были мощны двигатели его корабля. И никаких сигналов он не сможет послать оттуда. Для внешнего наблюдателя само падение корабля в черную дыру растягивается по его часам до бесконечности. Значит, то, что будет происходить с падающим наблюдателем и его кораблем внутри черной дыры, *протекает уже вне времени внешнего наблюдателя* (после его бесконечности по времени). В этом смысле черные дыры представляют собой дыры во времени Вселенной. Сразу оговоримся, что это вовсе не означает, что внутри черной дыры время не течет. Там время течет, но это «другое» время, текущее иначе, чем время внешнего наблюдателя» (курсив наш. — Л.Т.).

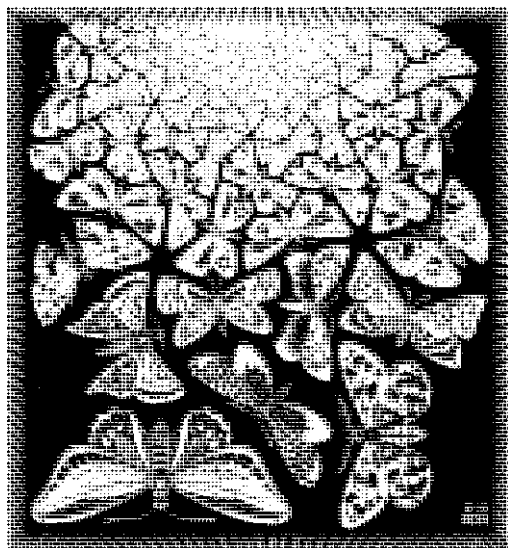
Возникает естественный вопрос: если черная дыра «запирает» внутри себя все, что туда попадает и, в частности, любое излучение, то каким образом можно было бы наблюдать подобный космический объект? В обычном смысле он действительно ненаблюдаем. Но о его существовании можно заключить, *рассматривая взаимодействие черной дыры с обычной звездой.* Известно, что многие звезды образуют пары (т. н. *двойные звезды*), которые вращаются вокруг общего центра масс пары. Предположим теперь, что черная дыра (массивная «мертвая» звезда) и нормальная светящаяся звезда образуют такую пару. Гравитационное поле черной дыры может оказаться достаточно сильным, чтобы срывать вещество с нормальной звезды. Тогда от внешних слоев нормальной звезды будет отделяться газ и, закручиваясь по спирали, будет втягиваться в черную дыру. Это схематически показано на рисунке 5 в таблице 34. Вблизи черной дыры газ сильно разогреется и будет испускать электромагнитное излучение в рентгеновском или гамма-диапазоне. Это излучение может быть зарегистрировано внеатмосферными приемниками излучения (космическими телескопами). В большинстве двойных систем, испускающих рентгеновское излучение, масса невидимого объекта не превышает двух солнечных масс; в этих случаях мы имеем дело с нейтронной звездой. Однако встречаются объекты такого типа, которые для нейтронной звезды слишком массивны. В этих случаях можно говорить о наличии черной дыры. Один из вероятных кандидатов в

черные дыры — интенсивный источник рентгеновских лучей в созвездии Лебедя (Лебедь X-1).

Как уже отмечалось, черные дыры могут возникать (как и нейтронные звезды) в результате гравитационного коллапса массивных звезд, в недрах которых не осталось ядерного горючего. Однако это, по-видимому, не единственный путь образования черных дыр. Американский астроном *Карл Кинан Сейферт* (1911–1960) открыл в 1943 году т. н. галактики с активными ядрами (их называют ныне также *сейфертовскими галактиками*). Начиная с конца 50-х годов, эти галактики детально исследовал известный советский астроном академик *Виктор Амазасович Амбарцумян* (1908–1998). Сейфертовские галактики характеризуются особенно яркими центральными областями (ядрами), в которых помимо скопления звезд присутствуют яркий звездоподобный источник излучения и светящийся газ, находящийся в весьма быстром движении и дающий иногда длинные узконаправленные выбросы. Мощность излучения одной сейфертовской галактики может достигать 10^{35} Вт. Причем эта столь огромная мощность выделяется в области диаметром всего около 1 пк. Что служит в данном случае источником энергии? Одна из возможных гипотез связана с черной дырой.

Предполагается, что в центре сейфертовской галактики существует черная дыра массой в десятки или даже сотни миллионов масс Солнца. В результате падения вещества на черную дыру выделяется огромная энергия. При столкновении газовых масс вблизи черной дыры гравитационная энергия преобразуется в мощное электромагнитное излучение.

Хаббловский космический телескоп и ряд крупных наземных телескопов позволили заключить о наличии больших масс несветящегося вещества в ядрах ряда галактик. Это вполне соответствует гипотезе, согласно которой причиной активности галактических ядер могут быть массивные черные дыры. В настоящее время нам неизвестно, как возникли такие черные дыры. Чтобы выяснить это, необходимо исследовать эволюцию галактик с активными ядрами.



СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВСЕЛЕННОЙ: ОТКРЫТИЯ И ПРОБЛЕМЫ КОСМОЛОГИИ

Попытка понять Вселенную — одна из очень немногих вещей, которые чуть приподнимают человеческую жизнь над уровнем фарса и придают ей черты высокой трагедии.

Стивен Вайнберг

Эволюцию мира можно сравнить со зрелищем фейерверка, который мы застали в момент, когда он уже кончается... Стоя на остывающем пепле, мы видим медленно угасающие солнца и пытаемся воскресить исчезнувшее великолепие начала миров.

Жорж Леметр

...Папа сказал, что эволюцию Вселенной после Большого Взрыва изучать можно, но не следует вторгаться в сам Большой Взрыв, потому что это был момент Сотворения и, следовательно, Божественный акт. К счастью, папа не знал темы только что сделанного

мною доклада о том, что пространство—время не имеет начала, а значит, нет и момента Сотворения. Мне не хотелось разделить судьбу Галилея...

Стивен Хокинг

(По воспоминаниям о Конференции
по космологии, организованной
в Ватикане в 1981 году)

15.1 РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Потрясающий воображение факт расширения Вселенной был сначала установлен теоретически. В 1922 году молодой российский математик и геофизик *Александр Александрович Фридман* (1888–1925) решил для Вселенной уравнения общей теории относительности, не накладывая условия стационарности. Он показал, что существуют два решения, одно из которых соответствует *расширяющейся* Вселенной, а другое — *сжимающейся* Вселенной. Эйнштейн в первый момент отрицательно отреагировал на результаты, полученные Фридманом, но уже в 1923 году он их признал, заявив, что его критика статьи Фридмана «О кривизне пространства» «основывалась на ошибке в вычислениях» и что он (Эйнштейн) считает результаты Фридмана «правильными и проливающими новый свет».

Не следует удивляться, что теоретические выводы Фридмана, подвергавшие сомнению общепринятую идею «статичной вечности» Вселенной, не получили должного отклика; большинство ученых не связывали эти выводы с реальностью. Но в 1929 году выводы Фридмана получили убедительное подтверждение после того, как *Эдвин Хаббл* экспериментально доказал, что Вселенная *действительно расширяется*. К сожалению, Фридман так и не узнал об этом: он скоропостижно скончался в 1923 году.

Эдвин Хаббл исследовал линейчатые спектры пяти десятков галактик, расстояния до которых были ему известны с достаточно хорошей точностью, и используя *эффект Доплера*, определил лучевые скорости рассматриваемых галактик (лучевая скорость галактики — проекция ее скорости на направление луча, идущего от галактики к наблюдателю). Напомним читателю: эффект Доплера заключается в том, что спектральные линии источника излучения *смещаются* на величину, пропорциональную скорости, с какой источник приближается к наблюдателю

или удаляется от него. Если источник приближается к наблюдателю, смещение линий происходит в сторону возрастания частоты излучения (*фиолетовое смещение*), а если источник удаляется от наблюдателя — то в сторону убывания частоты (*красное смещение*). Надо заметить, что красное смещение спектров галактик наблюдал в течение десяти лет, начиная с 1912 года, американский астроном *Вестон Мелвин Слайфер* (1875–1969). Но именно Эдвин Хаббл установил на основе аккуратно выполненных измерений знаменитый закон:

$$v = H r, \quad (1)$$

где r — вектор, направленный от наблюдателя к данной галактике и равный по модулю расстоянию до этой галактики, v — вектор лучевой скорости рассматриваемой галактики, H — некоторая постоянная, называемая ныне *постоянной Хаббла*. На рисунке 1 в таблице 35 представлена зависимость лучевой скорости v галактик от расстояния r , называемая *диаграммой Хаббла*. По современным, наиболее точным данным,

$$H = 65 \text{ (км/с)/Мпк}. \quad (2)$$

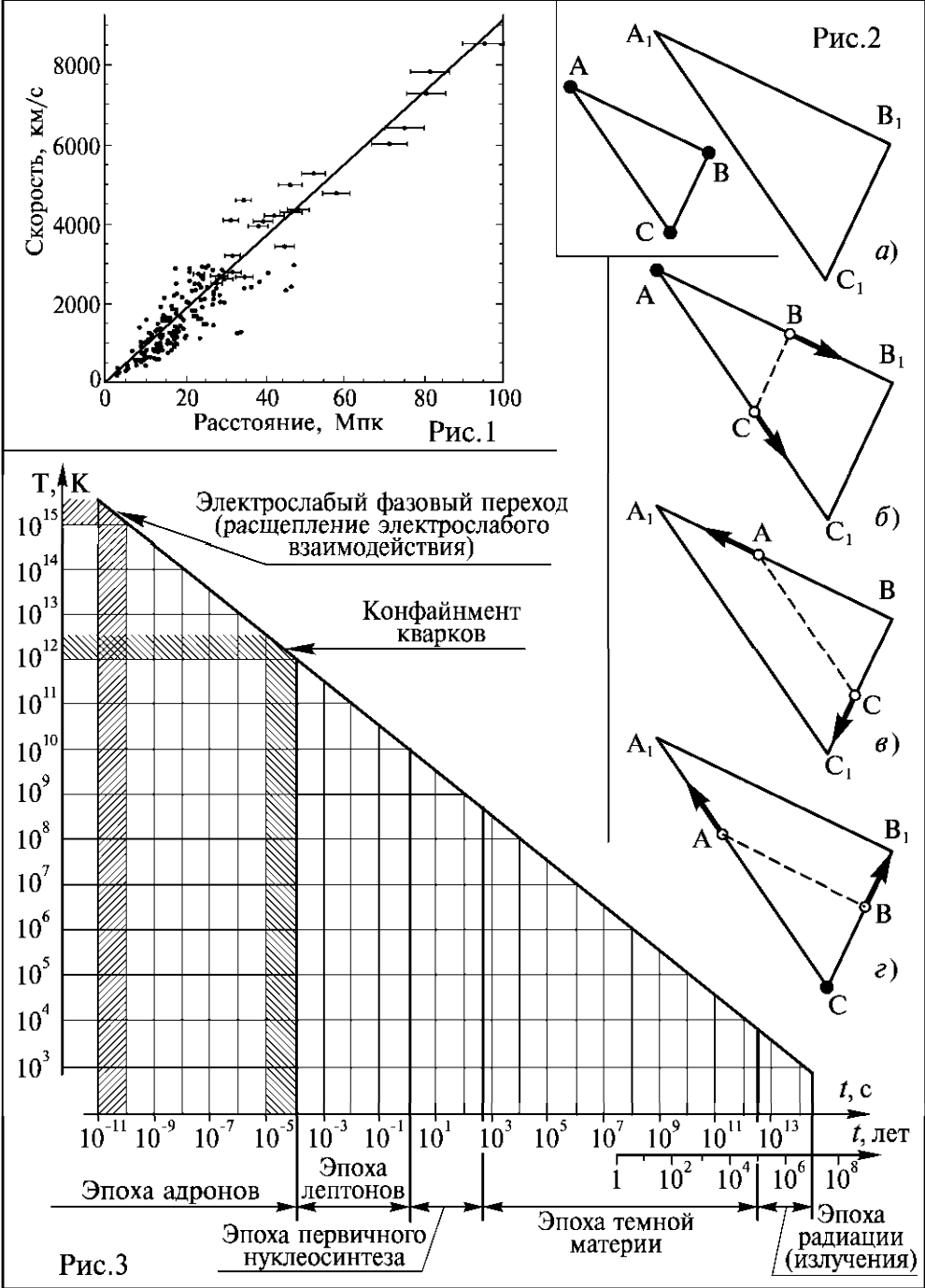
Заметим, что H имеет размерность обратного времени. Учитывая, что $1 \text{ пк} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}$, находим из (2), что

$$H = 2,106 \cdot 10^{-18} \text{ 1/с}. \quad (2a)$$

Итак, установлено, что Вселенная в самом деле не является статической системой — *Вселенная расширяется*. Чем дальше от нас находится галактика, тем больше ее лучевая скорость по отношению к земному наблюдателю. Закон Хаббла (1) часто формулируют так: *скорость разлета галактик прямо пропорциональна расстоянию от наблюдателя* (обычно говорят: расстоянию от нашей Галактики).

Разлет (разбегание) галактик дает достаточно наглядное представление о феномене расширения Вселенной. Однако такое представление провоцирует вопрос: если все галактики *разлетаются от нас*, то не следует ли отсюда, что мы, земляне, находимся в центре мира? Такой вывод несостоятелен, поскольку при расширении Вселенной разлет галактик будут регистрировать воображаемые наблюдатели из *любой* галактики (так что каждый из них может вообразить, что находится в центре мира). Сказанное поясняет простая схема на рисунке 2 в таблице 35. Пусть в момент t_1 имеются три галактики: A , B , C . «Вселенная», состоящая из этих галактик расширяется, так что в момент t_2 ($t_2 > t_1$) взаимное расположение наших галактик определяется треугольником

Таблица 35. Расширение Вселенной



$A_1 B_1 C_1$ (позиция *a* на рисунке). Допустим, наблюдатель находится в галактике *A* (см. позицию *b* на рисунке). Для него расширение «Вселенной» будет восприниматься как разлет других галактик — галактика *B* направляется в точку B_1 , а галактика *C* — в точку C_1 . Пусть теперь наблюдатель находится в галактике *B* (см. позицию *e* на рисунке). Для него расширение «Вселенной» — тоже разлет остальных галактик (галактика *A* направляется в A_1 , а галактика *C* — в C_1). Позиция *z* на нашем рисунке показывает, что аналогичные выводы сделает наблюдатель, находящийся в галактике *C*.

Таким образом, говоря о расширении Вселенной, не следует думать, что она расширяется из *определенной точки пространства*. Такой точки просто не существует. А как быть со временем? Для наблюдателя из любой галактики существует момент времени, когда *начался* процесс расширения Вселенной. Начало расширения Вселенной принято связывать с грандиозным событием, получившим название *Большого Взрыва*. Исходя из закона Хаббла (1), ученые пришли к заключению, что Большой Взрыв произошел приблизительно 15 миллиардов лет назад. Это есть оценка *возраста Вселенной*; она родилась в Большом Взрыве и существует вот уже 15 миллиардов лет.

15.2 БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

Можно предположить, что в связи с последним утверждением у читателя возникнет ряд вопросов. Почему именно взрыв? В чем его сходство и в чем отличие в сравнении с обычными взрывами, которые можно наблюдать в земных условиях? Какой была Вселенная в момент этого Взрыва? Как из закона Хаббла выводится число 15 млрд. лет?

Начнем с того, что напомним, как происходит взрыв, например, заряда тротила. Через несколько микросекунд после того, как началась химическая реакция, вызванная нагревом, заряд превращается в горячую смесь газов, находящуюся под давлением в сотни тысяч атмосфер. Тут же начинается стремительный процесс расширения газов, который как раз и называется взрывом. Его интенсивность определяется *разностью давлений* газообразных продуктов химической реакции и атмосферного воздуха (если взрыв происходит в атмосфере). Благодаря этой разности давлений разрывается оболочка заряда, и разлетаются осколки. Продукты реакции расширяются, их плотность уменьшается, снижаются температура и давление. Это происходит до тех пор, пока давление расши-

ряющегося газа не сравняется с атмосферным давлением. Если взрыв произведен в пустоте (в космосе), расширение газа будет продолжаться неограниченно долго. При этом осколки будут разлетаться с практически постоянными скоростями, приобретенными при взрыве.

Сравним рассмотренный химический взрыв с Большим Взрывом. Будем полагать, что химический взрыв произошел в космосе, так что можно исключить влияние атмосферы на разлетающееся вещество. Поскольку после периода ускорения разлет частиц происходит с постоянной скоростью, заключаем, что пройденный той или иной частицей путь r за время t определяется простой формулой:

$$r = vt, \quad (3)$$

где v — скорость рассматриваемой частицы. Из (3) сразу следует, что

$$v = (1/t)r, \quad (4)$$

а это есть не что иное как закон Хаббла для расширяющейся Вселенной. Еще одна черта сходства между Большим Взрывом и химическим взрывом состоит в том, что по мере расширения происходит постепенное охлаждение разлетающегося вещества и уменьшение его плотности. «Первоначальная» Вселенная была весьма горячей и плотной.

Все это, казалось бы, вполне объясняет использование термина «взрыв» для события, которое привело к расширению Вселенной. На первый взгляд может показаться, что отличие Большого Взрыва от химического взрыва сводится к масштабам процессов, к чисто количественным различиям в величинах температуры и плотности. Конечно, количественные различия есть и притом весьма и весьма значительные. При химическом взрыве максимальная температура измеряется тысячами градусов, а плотность граммами (десятками граммов) в кубическом сантиметре, тогда как в случае Большого Взрыва приходится говорить о температурах, превышающих миллиарды градусов, и о плотностях, превышающих миллионы граммов на кубический сантиметр.

Все это так. Однако главное отличие Большого Взрыва от химического взрыва не количественное, а *качественное*. И притом настолько принципиальное, что приходится усомниться в удачности использования термина «взрыв» в космологии. При химическом взрыве обязательно есть граница, по одну сторону от которой находится разлетающееся вещество, а по другую — атмосферный воздух или пространство космоса; при этом плотность разлетающегося вещества в каждый момент времени различна в разных точках пространства. В случае же Большого

Взрыва не существует каких-либо пространственных границ, здесь не имеют смысла понятия «снаружи» и «внутри» — происходит не расширение Вселенной *внутри пространства*, а *расширение самого пространства Вселенной*. Как заметил Стивен Хокинг, «в общей теории относительности бессмысленно говорить о пространстве и времени за пределами Вселенной». Кроме того, в любой момент времени плотность Вселенной была везде одинаковой. Первый миллион лет материя была распределена по Вселенной совершенно однородно, и хотя потом сформировались постепенно галактики и звезды, Вселенная осталась в крупных масштабах однородной. Подчеркнем, что если при химическом взрыве решающую роль играет *различие давления в разных точках пространства*, то расширение Вселенной никак не связано с существованием каких-либо пространственных перепадов давления. Вот и получается, что Большой Взрыв нельзя считать взрывом в обычном понимании этого слова. Как говорят, Федот, да не тот.

Какой была Вселенная в самом начале Большого Взрыва? В 1927 году (т. е. еще до установления Хабблом его знаменитого закона) бельгийский астроном *Жорж Леметр* (1894–1966) высказал идею о расширении Вселенной из сверхплотного состояния. Через двадцать лет, в 1946 году, эта идея была дополнена гипотезой выдающегося российского физика-теоретика *Георгия Антоновича Гамова* (1904–1968), согласно которой первоначальное состояние Вселенной характеризовалось также чрезвычайно высокой температурой (гипотеза *горячей Вселенной*). Еще через двадцать лет эта гипотеза была экспериментально подтверждена в результате открытия так называемого *реликтового излучения* (см. § 15.3).

Отвечая на последний из перечисленных ранее возможных вопросов читателя (вопрос о возрасте Вселенной), обратимся к (3). Если иметь в виду, что v — постоянная скорость разлета галактики, находящейся в точке g , то t как раз и есть промежуток времени, в течение которого происходил разлет, то есть, иначе говоря, это и есть возраст Вселенной. С учетом (4) и (2а) получаем, что этот возраст равен $4,748 \cdot 10^{17}$ с. Один год равен $3,157 \cdot 10^7$ с. Следовательно, возраст Вселенной составляет $(4,748 : 3,157) \cdot 10^{10}$ лет ≈ 15 млрд. лет.

Итак, 15 миллиардов лет назад в результате Большого Взрыва произошло рождение Вселенной. Создавая космологические модели, ученые исходят из того, что Вселенная родилась из *сингулярности*, характеризующейся бесконечно малыми размерами, бесконечно высокой плотностью, бесконечно большой температурой (мы вернемся к этому вопросу в § 15.6).

15.3 ОТКРЫТИЕ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Каким образом можно получить экспериментальные доказательства того, что 15 миллиардов лет назад действительно состоялся Большой Взрыв? Это можно сделать, исследуя наблюдаемые сегодня следы или, лучше сказать, *отголоски* того события. Что же это за следы? Раскроем снова книгу И.Д. Новикова «Как взорвалась Вселенная». Там по этому поводу говорится следующее:

«Речь идет о микроволновом электромагнитном излучении, заполнившим сегодня всю Вселенную. Известный советский астрофизик Шкловский назвал его реликтовым. Оно сохранилось как реликт тех далеких времен, когда вещество в начале расширения Вселенной было горячим. Сама идея большой температуры в начале расширения была выдвинута Гамовым в середине 40-х годов. Он же указал, что следствием его гипотезы является наличие в сегодняшней Вселенной остывшего из-за расширения реликтового излучения, и оценил его примерную температуру в несколько кельвинов».

Заметим, что по оценке Гамова температура реликтового излучения должна была составлять примерно 5 К. Американский физик *Роберт Дикке* (род. 1916 г.) заинтересовался работой Гамова и в начале 60-х годов начал совместно со своими коллегами из Принстонского университета США разрабатывать программу поиска реликтового излучения. Ученые сомневались в успехе, полагая, что реликтовое излучение весьма трудно будет выделить на фоне излучений от звезд и галактик. В 1964 году российские астрофизики *Андрей Георгиевич Дорошкевич* и *Игорь Дмитриевич Новиков* показали, что в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн реликтовое излучение должно во много раз превосходить излучение от звезд и галактик и, следовательно, в указанном диапазоне волн оно вполне может быть обнаружено с помощью радиотелескопа. К сожалению, группа Дикке не обратила внимания на статью Дорошкевича и Новикова, и можно считать, что открытие реликтового излучения произошло в 1965 году в полном смысле случайно.

Его открыли не радиоастрономы, а радиоинженеры, которые не интересовались тогда гипотезой горячей Вселенной и не собирались искать реликтовое излучение. Речь идет об американцах *Арно Пензиасе* (род. 1933 г.) и *Роберте Вильсоне* (род. 1936 г.), работавших в корпорации «Белл». Вот как описано открытие реликтового излучения в книге М.В. Сажина «Современная космология в популярном изложении» (М.: «Едиториал УРСС», 2002):

«Они (Пензиас и Вильсон) создали новый радиометр для целей связи. При испытаниях этого радиометра они обнаружили некоторый шум, избыточный по

сравнению с техническим заданием. Внимательно исследовав радиометр, они сделали вывод, что избыточный шум связан с неким космическим излучением. Удивительное свойство этого излучения заключалось в том, что его мощность не зависела от направления на небесный свод... Пензиас и Вильсон написали статью об открытии нового источника излучения и направили ее в журнал. К тому времени профессор Дикке из Принстонского университета уже готовил аппаратуру для поиска реликтового излучения. Статья попала к нему на рецензию, он мгновенно оценил ее, дал положительную рецензию для опубликования и сам написал короткую заметку, содержащую интерпретацию результатов, полученных Пензиасом и Вильсоном. Так состоялось открытие реликтового излучения. За эту работу Пензиас и Вильсон были удостоены Нобелевской премии за 1978 год».

Итак, открытие реликтового излучения в 1965 году состоялось благодаря тому, что проводившие испытания нового радиометра Пензиас и Вильсон счастливым образом попали в «нужный» диапазон длин волн. Они проводили испытания на длине волны 7,35 см. Согласно полученным ими результатам, температура реликтового излучения оказалась равной 3,5 К. Сегодня наиболее точные измерения дают результат 2,725 К.

Экспериментальное обнаружение фонового электромагнитного излучения (реликтового излучения) убедительно свидетельствовало в пользу модели горячей расширяющейся Вселенной. Именно с этого момента факт Большого Взрыва перестал быть гипотезой. Выступая в 1982 году на XVIII Генеральной ассамблее Международного астрономического союза, академик Я.Б. Зельдович заявил: *«Теория Большого Взрыва в настоящий момент времени не имеет сколько-нибудь заметных недостатков. Я бы даже сказал, что она столь же надежно установлена и верна, сколь верно то, что Земля обращается вокруг Солнца».*

15.4 ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЭВОЛЮЦИИ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ, НАЧИНАЯ С ПЕРВОЙ ДЕСЯТИМИЛЛИАРДНОЙ ДОЛИ СЕКУНДЫ

15.4.1. Последовательность «эпох», сменяющих друг друга по мере расширения и остывания Вселенной. Данный параграф можно было бы озаглавить так: «Как происходило расширение Вселенной после того, как ее возраст составил 10^{-10} с, а температура снизилась до 10^{15} градусов». Возраст Вселенной измеряем от момента Большого Взрыва или, точнее, от момента начала расширения Вселенной.

Предвидим два вопроса читателя. А что было раньше, когда возраст Вселенной был меньше 10^{-10} с? Почему здесь выбран момент 10^{-10} с

после начала расширения Вселенной? На первый вопрос мы попробуем ответить в § 15.6. Отвечая на второй вопрос, отметим, что к моменту 10^{-10} с произошел, как говорят ученые, *электрослабый фазовый переход*. До этого момента электромагнитное и слабое взаимодействия являлись *единым взаимодействием* (его называют *электрослабым взаимодействием*). В результате упомянутого фазового перехода бозоны W^+ , W^- , Z^0 становятся массивными; с этим связано «*расщепление*» *электрослабого взаимодействия на электромагнитное и слабое*. Последнее оказывается весьма короткодействующим, поскольку его переносчики — бозоны с большой массой (превышающей 10^5 масс электрона). Итак, именно с момента 10^{-10} с после Большого Взрыва дальнейшее развитие Вселенной определяется набором из *четырех* фундаментальных взаимодействий — гравитационного, электромагнитного, слабого, сильного.

На рисунке 3 в таблице 35 приведен график зависимости температуры T Вселенной от ее возраста t . График наглядно демонстрирует постепенное остывание первоначально горячей Вселенной. Обе оси координат выбраны здесь *логарифмическими*. Это чрезвычайно удобно, так как график зависимости T от t изображается в этом случае *прямой линией* и без труда экстраполируется в обе стороны (видно, что увеличению возраста Вселенной на два порядка соответствует снижение ее температуры на один порядок). Использование логарифмических шкал позволило рассмотреть в пределах одного графика интервал значений t от 10^{-11} с до 10^{14} с (от стомиллиардной доли секунды до нескольких миллионов лет!). Поскольку в году содержится $3 \cdot 10^7$ секунд, то удобно, начиная с $t = 10^7$ с, отсчитывать время уже не в секундах, а в годах.

На рассматриваемом рисунке выделены несколько промежутков времени, условно названных *эпохами* (в литературе такие промежутки называют также эрами, периодами, стадиями). Здесь выделены следующие эпохи, характеризующие основные этапы эволюции расширяющейся Вселенной:

- *эпоха адронов* (она завершилась к $t = 10^{-4}$ с),
- *эпоха лептонов* (завершилась к $t = 1$ с),
- *эпоха первичного нуклеосинтеза* (завершилась к $t = 300$ с),
- *эпоха темной материи* (закончилась при $t = 10^5$ лет),
- *эпоха радиации (излучения)* (условно завершилась к $t = 10^7$ лет). Затем пришло время не отмеченной на рисунке 3 *эпохе вещества*, которая продолжается по настоящее время.

Рассмотрим кратко все эти эпохи.

15.4.2. Эпоха адронов. Начало эпохи не поместилось на графике, изображенном на рисунке 3 в таблице 35. Оно относится к моменту $t = 10^{-35}$ с —

когда «отщепилось» сильное взаимодействие (единственное из четырех фундаментальных взаимодействий, в котором, как читатель уже знает, участвуют *только адроны* и не участвуют ни фотоны, ни лептоны — см. § 11.10). Экстраполируя график на рисунке 3, нетрудно получить, что при $t = 10^{-35}$ с Вселенная имела температуру около 10^{27} К (сдвигу по времени влево на 24 порядка соответствует подъем по шкале температур на 12 порядков).

Начавшись с «отщепления» сильного взаимодействия при $t = 10^{-35}$ с, эпоха адронов завершилась при $t = 10^{-4}$ с *конфайнментом кварков*, т. е. *образованием самих адронов* (протонов, нейтронов и др.). В промежутке между $t = 10^{-35}$ с и $t = 10^{-4}$ с (при температурах Вселенной от 10^{27} К до 10^{12} К) кварки существовали в свободном виде, так что правильнее было бы именовать эпоху адронов *эпохой кварков*. Впрочем, дело не в наименованиях, а в сути происходящих процессов. После того как температура Вселенной стала ниже 10^{12} К, кварки оказались пленными внутри адронов; там они остаются и в настоящее время.

На заключительном этапе эпохи адронов (при температурах от 10^{13} до 10^{12} К) произошло, кроме образования самих адронов и их античастиц, еще одно весьма важное событие — *аннигиляция адронов и антиадронов*. Если бы в единице объема число адронов того или иного типа *в точности равнялось* числу соответствующих антиадронов, то финалом эпохи адронов было бы исчезновение как адронов, так и антиадронов. Теперь процессам аннигиляции уже не могли «противостоять» процессы рождения пар адронов и антиадронов — для этого не хватало энергии. К счастью для нас всех, процесс рождения кварков и антикварков, происходивший в более горячий период Вселенной, характеризовался едва заметной *асимметрией*, вследствие чего *на миллиард антикварков приходился миллиард соответствующих кварков плюс еще один кварк*. Благодаря этому при аннигиляции адронов и антиадронов образовался незначительный остаток, обусловленный избытком кварков. Именно поэтому наша Вселенная оказалась построенной из вещества, а антивещество присутствует в ней в весьма незначительных количествах. Превышение количества вещества над антивеществом называют *барионной асимметрией Вселенной*.

15.4.3. Эпоха лептонов. Эта эпоха длилась от $t = 10^{-4}$ с до $t = 1$ с; температура за этот промежуток времени снизилась с 10^{12} К до 10^{10} К. Основное событие здесь связано с тем, что процессы

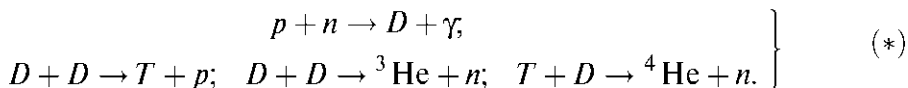
$$e^+ + e^- \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e \quad \text{и} \quad \nu_e + \bar{\nu}_e \rightarrow e^+ + e^-.$$

перестали быть равновероятными. С уменьшением температуры Вселенной стало не хватать энергии нейтрино и антинейтрино для рождения

электронно-позитронных пар; поэтому процессы $\nu_e + \bar{\nu}_e \rightarrow e^+ + e^-$ практически прекратились, главными стали процессы $e^+ + e^- \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$. Это означает, что к концу первой секунды после Большого Взрыва Вселенная стала прозрачной для нейтрино и антинейтрино.

При дальнейшем расширении Вселенной нейтрино (антинейтрино) сохранили свою свободу, так что в принципе можно обнаружить *реликтовые нейтрино* и тем самым получить дополнительную информацию о тех процессах, которые происходили в лептонную эпоху. Но нейтрино весьма трудно уловить, поэтому реликтовые нейтрино пока не обнаружены.

15.4.4. Эпоха первичного нуклеосинтеза. Эта эпоха началась примерно через секунду после Большого Взрыва и длилась приблизительно 5 минут. Температура Вселенной составляла в данную эпоху 10^{10} – 10^9 К. При таких температурах шли следующие термоядерные процессы:



(здесь T — тритий, ядро атома ${}^3\text{H}$; оно состоит из протона и трех нейтронов). Эти процессы называют *первичным синтезом атомных ядер (первичным нуклеосинтезом)*. Благодаря ему первичное вещество Вселенной оказалось состоящим на 25% (по массе) из ядер гелия и на 75% из протонов. Сотые доли процента составили ядра лития и бериллия, а ядра более тяжелых элементов вообще не образовались, поскольку для их синтеза температура Вселенной к этому моменту была уже недостаточной. Тяжелые ядра синтезируются позднее — в термоядерных реакциях, протекающих в недрах звезд.

15.4.5. Эпоха темной материи. Принято считать, что после того, как закончился первичный нуклеосинтез, ничего особенного не происходило в течение ста тысяч (или нескольких сотен тысяч) лет. Просто продолжалось расширение и, соответственно, охлаждение Вселенной. Весь этот «спокойный» период может быть назван *эпохой темной материи*, или, иначе, *эпохой скрытой массы*.

Наличие во Вселенной не поддающейся прямому наблюдению темной материи (скрытой массы) надежно установлено в середине 80-х годов прошлого столетия на основе наблюдений скоростей отдельных галактик в скоплениях галактик, а еще раньше по наблюдению скоростей, с какими движутся звезды вокруг центра нашей Галактики. Не входя в детали, заметим, что скорость v движения звезды массы m по круговой орбите радиуса r определяется соотношением (второй закон Ньютона):

$$GM(r)m/r^2 = v^2m/r,$$

откуда следует, что

$$v = \sqrt{GM(r)/r} \quad (5)$$

(здесь $M(r)$ — общая масса, притягивающая звезду, движущуюся по орбите радиуса r). На рисунке 1 в таблице 36 сопоставляются две кривые; сплошная кривая — наблюдаемая зависимость орбитальной скорости v звезды в зависимости от расстояния r звезды до центра некоторой спиральной галактики, а пунктирная кривая — зависимость $v(r)$, вычисленная на основе данных о распределении видимой (светящейся) массы для той же галактики. Налицо серьезные расхождения между сплошной и пунктирной кривыми. Их можно объяснить, лишь предположив *наличие некоей скрытой (невидимой) массы*, которая должна быть распределена по галактике более равномерно, чем светящаяся масса, и, более того, может простирается за пределы видимого диска галактики.

Из книги Л.М. Мухина «Мир астрономии» (М.: «Молодая гвардия», 1987): «Обычно в галактиках максимум яркости приходится на центр, а к периферии яркость быстро падает. Долгие годы астрономы полагали, что яркость пропорциональна массе, и поэтому масса, как и яркость, также уменьшается с расстоянием от центра Галактики. В этом случае естественно было ожидать, что орбитальные скорости звезд будут уменьшаться с увеличением расстояния от центра Галактики. В последнее время выполнены тщательные наблюдения вращающихся дисков многих спиральных галактик. Эти наблюдения принесли поистине сенсационные результаты. Оказалось, что в удаленных от центра галактик районах скорость вращения не уменьшается по мере увеличения радиуса. Этот факт может означать лишь одно: масса, в отличие от яркости, отнюдь не концентрируется к центру галактик. По-видимому, спиральные галактики окружены мощной сферической короной темной материи, причем размеры этой короны простираются далеко за пределы видимого диска галактик. Судя по всему, именно существование этого невидимого вещества и его гравитационное притяжение препятствуют уменьшению скорости вращения с увеличением расстояния от центра».

Природа темной материи пока не выяснена. На этот счет существуют несколько предположений. Отметим, в частности, гипотезу российского физика-теоретика *Александра Викторовича Гуревича* (род. 1930 г.), согласно которой темная материя состоит из слабовзаимодействующих элементарных частиц, участвующих только в гравитационном взаимодействии (этим частицам дали название *нейтралино*). Предполагается, что нейтралино образуют связанные объекты колоссальных размеров (превышающих расстояние от Земли до Солнца), похожие на облака и

имеющие относительно малую плотность (меньше плотности воздуха вблизи земной поверхности).

В настоящее время проводятся интенсивные наблюдения с целью выявления распределения темной материи во Вселенной. Они не ограничиваются исследованиями скоростей звезд и галактик. Используются и другие методы, например, *метод гравитационного линзирования*, поскольку скрытая масса может действовать как гравитационная линза и отклонять световые лучи в соответствии с предсказаниями общей теории относительности. Кажется весьма удивительным, что Вселенная в значительной мере состоит из неизвестной (пока неизвестной) формы материи. Более того, существует мнение, что Вселенная состоит из темной материи, возможно, на 90% по массе.

Читатель вправе заметить, что поскольку темная материя присутствует и даже, возможно, доминирует в современной Вселенной, то вряд ли справедливо ограничивать «эпоху темной материи» промежутком времени от первых пяти минут до первых ста тысяч лет. Действительно, существование темной материи отнюдь не прекратилось, когда Вселенной исполнилось сто тысяч лет. Просто после этого началась *эпоха радиации*, — когда Вселенная стала прозрачной для излучения, т. е. когда во Вселенной появилось свободное электромагнитное излучение (не только оптического, но и других диапазонов длин волн). До момента $t = 10^5$ лет во Вселенной могла быть лишь несветящаяся материя; позднее, еще до того, как зажглись звезды и галактики, наряду с темной материей образовалась также светящаяся (причем не только видимым светом) материя.

15.4.6. Эпоха радиации (излучения). Эта эпоха началась, когда возраст Вселенной перевалил за 10^5 лет, а температура снизилась примерно до 5000 К. В данную эпоху произошло то, что принято называть «отрывом излучения от вещества» (правильнее было бы говорить о *разделении вещества и излучения*). Вследствие понижения температуры нарушилось существовавшее ранее равновесие между процессами присоединения электронов к протонам с образованием нейтральных атомов (процессами *рекомбинации*) и процессами отрыва электронов от атомов (процессами *ионизации*). Вероятность процессов рекомбинации стала много больше вероятности процессов ионизации. В результате рекомбинации протоны и α -частицы обзавелись электронными оболочками и превратились в *нейтральные атомы* водорода и гелия.

Раньше, до рекомбинации, Вселенная представляла собой заполняющую все пространство *горячую плазму*, которая состояла из частиц тем-

ной материи, протонов, электронов, фотонов, некоторого количества легких ядер. Такая Вселенная была прозрачна только для нейтрино и антинейтрино (и то лишь по прошествии первой секунды после Большого Взрыва). Для электромагнитного излучения (для фотонов) такая Вселенная была непрозрачна, поскольку фотоны активно взаимодействовали с горячей плазмой.

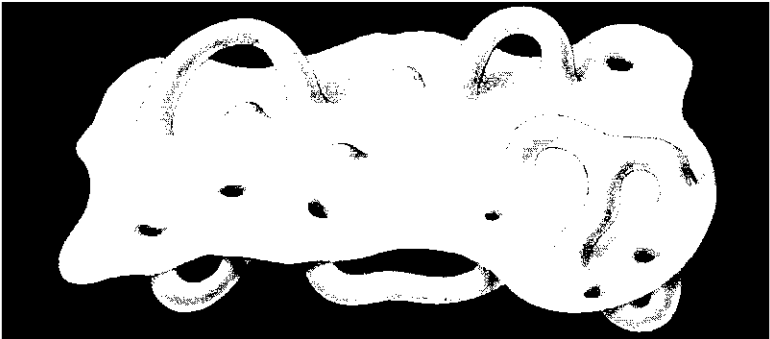
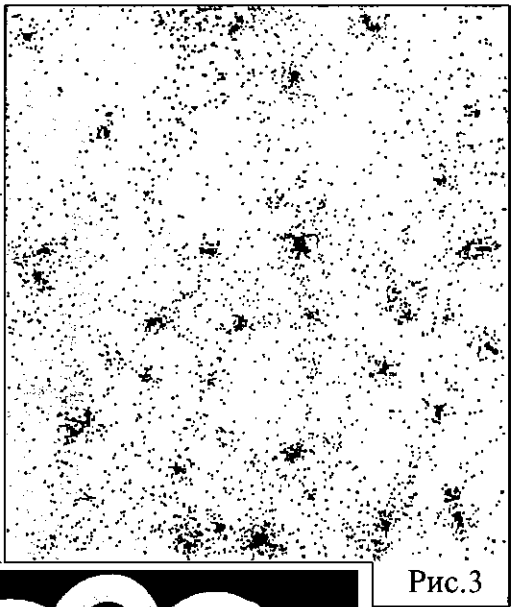
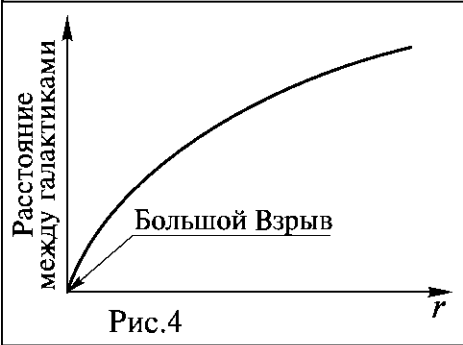
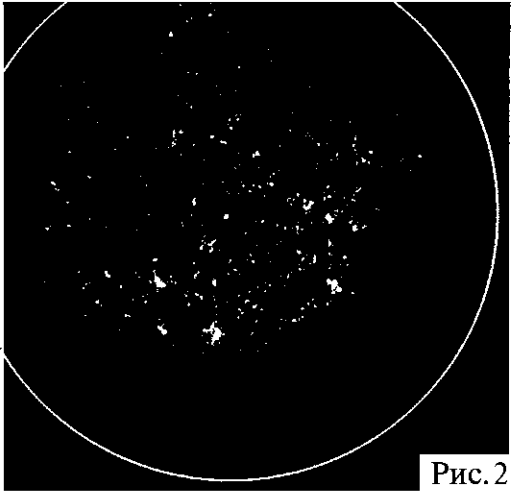
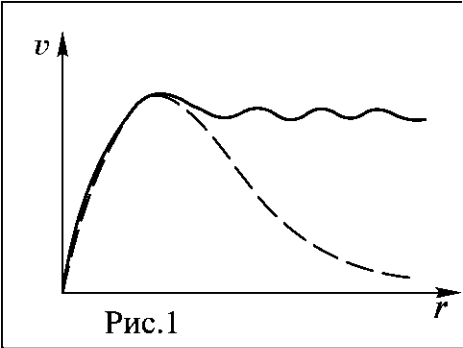
Теперь же, когда образовались нейтральные атомы водорода и гелия, и ушла в прошлое «чисто плазменная» Вселенная, фотоны обрели свободу. *Вселенная стала прозрачной не только для нейтрино, но и для электромагнитного излучения.* Это и есть отрыв излучения от вещества, или, иными словами, разделение вещества и излучения. С дальнейшим течением времени излучение по мере расширения Вселенной продолжало остывать; к настоящему времени его температура снизилась до 2,7 К. Оно превратилось в наблюдаемое сегодня реликтовое излучение — остывший остаток того излучения, которое в эпоху радиации «оторвалось от вещества».

Так как Вселенная и по сей день практически прозрачна для электромагнитного излучения, то можно считать, что эпоха радиации до сих пор продолжается. Но поскольку, начиная с возраста в 1–10 миллионов лет началась самостоятельная (независимо от излучения) эволюция вещества, то логичнее говорить о начале новой эпохи — эпохи вещества.

15.4.7. Эпоха вещества. Она началась, когда Вселенной исполнилось 10^7 лет и температура снизилась до 10^3 К. Основные события этой эпохи связаны с *рождением и эволюцией галактик и звезд*, которые стали возникать десятки и сотни миллионов лет спустя. В данную эпоху гравитационное взаимодействие обусловило процесс образования *водородных облаков* из случайно возникающих уплотнений в космическом водородном газе.

Исследования, выполненные в 70-х годах прошлого столетия Яковом Борисовичем Зельдовичем и его учениками, показали, что вначале водородные облака должны были приобретать не сферическую форму, а форму, напоминающую *блины*. В разных частях расширяющейся Вселенной возникали разнообразные гигантские «блины», из которых со временем формировались как одиночные галактики, так и скопления галактик. В результате реализовалась наблюдаемая сегодня *крупномасштабная структура Вселенной* (мы поговорим о ней подробнее в § 15.5), в которой явно просматриваются «ячейки» галактик и гигантские пустоты, свободные от галактик (так называемые *войды*; они имеют размеры в сотни мегапарсек).

Таблица 36. Некоторые проблемы современной космологии



На рисунке 2 в таблице 36 представлена специально обработанная фотография значительной части звездного неба, демонстрирующая ячеистую (сетчатую) сверхструктуру, элементами которой служат примерно миллион галактик ярче 19-й звездной величины. На рисунке 3 в той же таблице показана полученная в Институте прикладной математики АН СССР компьютерно смоделированная картина распределения точечных масс, находящихся под действием сил тяготения. Эта картина отчетливо иллюстрирует ячеистую сверхструктуру Вселенной — наличие скоплений галактик и значительных пустот между скоплениями.

О том, как рождаются и эволюционируют звезды, мы достаточно подробно говорили в теме 14. Следует лишь добавить, что наше Солнце зажглось примерно через 10 млрд. лет после Большого Взрыва. Оно является звездой второго или даже третьего поколения. Ко времени рождения Солнца и Солнечной системы многие крупные звезды завершили свой «жизненный путь» взрывами Сверхновых, благодаря которым во Вселенной появились атомы тяжелых химических элементов. В сравнительно малых пропорциях эти атомы имеются на Солнце и в больших пропорциях они присутствуют в недрах планет Солнечной системы, включая Землю.

15.4.8. К вопросу о будущем Вселенной. В простейшем случае возможны два варианта. Первый вариант (*открытая модель*): Вселенная будет продолжать расширяться неограниченно долго (см. рисунок 4 в таблице 36). Второй вариант (*закрытая модель*): расширение Вселенной через некоторое время сменится ее сжатием (см. рисунок 5 в таблице 36). Во втором варианте Вселенная обречена на грандиозную катастрофу. Как образно выразился один из видных физиков (Фримен Джон Дайсон), это будет «коллапс в огненной смерти, когда небо становится все горячее и горячее, пока оно, наконец, не обрушится на нас и не загонит нас в пространственно-временную сингулярность с бесконечной температурой». В варианте закрытой модели наряду с сингулярностью, порождающей Вселенную, появляется сингулярность, уничтожающая ее; наряду с Большим Взрывом появляется Большой Крах.

Какой из двух вариантов «выберет» Вселенная? Это зависит от значения средней плотности вещества Вселенной. Разлет вещества Вселенной (т. е. расширение Вселенной) происходит по инерции, поскольку уже при $t = 10^{-35}$ с прекратилось действие сил, заставляющих Вселенную расширяться (см. § 15.6). Но продолжают действовать силы, тормозящие процесс расширения, — это силы гравитационного притяжения. Они-то и могут, в принципе, вынудить расширяющуюся Вселенную начать через какое-то время сжиматься. Это произойдет, если средняя

плотность вещества во Вселенной больше так называемой *критической плотности*, которая равна 10^{-29} г/см³.

Известный голландский астроном *Ян Хендрик Оорт* (1900–1992), исходя из известных результатов наблюдений галактик, пришел в 1958 году к заключению (подтвержденному многими последующими наблюдениями), что средняя плотность вещества во Вселенной, относящегося к светящейся материи, составляет $3 \cdot 10^{-31}$ г/см³, т. е. в тридцать раз меньше критической плотности. На первый взгляд, отсюда следует, что Вселенная должна эволюционировать по варианту открытой модели. Однако не следует торопиться с таким заключением. Если учесть возможность ненулевой массы нейтрино, наличие черных дыр, а главное, существование пока еще загадочной темной материи, то средняя плотность вполне может оказаться больше (и даже заметно больше) критической плотности. Делаются оценки вероятности того или иного варианта, однако, строго говоря, вопрос пока остается открытым.

15.5 КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ, ИЛИ: ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ЛЕСТНИЦА СТРУКТУР ВСЕЛЕННОЙ

Напомним, что в начале XX столетия ученые полагали, что наша Галактика — это, собственно говоря, и есть вся Вселенная. Ошибочность такого представления обнаружилась после того, как астрономы определили размеры Галактики и сравнили их с расстояниями до ряда туманностей, оказавшихся другими галактиками.

Согласно современным представлениям, наша Галактика и ее спутники (Магеллановы Облака и несколько карликовых галактик) плюс галактики в созвездиях Андромеды и Треугольника образуют устойчивое *скопление галактик* — так называемую *Местную группу галактик*. В 70-х годах было обнаружено весьма вытянутое водородное облако, протянувшееся через Магеллановы Облака от созвездия Пегаса к созвездию Скульптора. Этот гигантский «водородный рукав» получил название *Магелланова потока*. Он свидетельствует о происходящих в Местной группе галактик активных эволюционных процессах.

Местная группа галактик — не единственное скопление галактик. Соседнее скопление, находящееся на расстоянии 20 Мпк от нас, обнаружено в созвездии Девы. По оценкам астрономов, в этом скоплении не менее 200 достаточно ярких галактик и более двух тысяч галактик с малой светимостью. Размеры данного скопления галактик около 2 Мпк.

Сегодня известны десятки скоплений галактик. Они удалены от нас на фантастически огромные расстояния — от 100 Мпк до 5000 Мпк. Только подумать: для преодоления расстояния в 5000 Мпк свету требуется полтора миллиарда лет! В каждом скоплении галактик содержится, кроме разреженного газа, огромное количество темной материи. Ученые полагают, что именно скрытая масса удерживает галактики в скоплениях, обеспечивая устойчивость последних.

Но скопления галактик — это не последняя ступенька в иерархической лестнице структур Вселенной. Скопления галактик образуют, в свою очередь, *скопления скоплений*, которые можно назвать *сверхскоплениями*. Наш космический адрес выглядит так:

- планета Земля,
- Солнечная система,
- Галактика,
- Местная группа галактик (наше скопление галактик),
- Локальное сверхскопление (наше скопление скоплений галактик).

Хорошо известно, что наблюдаемый на нашем звездном небе Млечный путь — это видимая «с ребра» часть нашей Галактики. Но не всем известно, что почти перпендикулярно к Млечному пути расположен менее яркий второй «Млечный путь». Вот он-то и есть видимое «с ребра» Локальное сверхскопление. Его размеры достигают 60 Мпк. К настоящему времени астрономы насчитали более 20 000 галактик в нашем сверхскоплении галактик. Все вместе они образуют нечто вроде гигантского эллипсоида с отношением осей 1 : 10.

Из книги Е.П. Левитана «Эволюционирующая Вселенная» (М.: «Просвещение», 1993): «Наша Галактика скромно ютится на окраине Локального сверхскопления. Эти данные внегалактической астрономии можно трактовать как очередной удар по нашему стремлению вообразить себя в центре Вселенной (сначала таким центром считали Землю, потом Солнце, потом нашу Галактику). Но и Локальное сверхскопление сейчас уже не отождествляется со всей охваченной наблюдениями части Вселенной. Открыты десятки других сверхскоплений галактик... Например, обнаружено огромное сверхскопление, которое простирается от созвездия Персея до области небесной сферы, где находятся созвездия Пегаса и Рыб. Это уже не эллипсоид, а скорее, нить с бусинками (каждая бусинка — скопление галактик!) длиной около 400 Мпк. Сверхскопления венчают собой иерархию структур нашей Вселенной: во Вселенной не существует системы более высокого «ранга», чем сверхскопления галактик».

Нам остается добавить, что именно скопления и сверхскопления галактик образуют крупномасштабную структуру Вселенной с ее «ячейками» и гигантскими пустотами, о которой мы уже говорили в 15.4.7.

15.6 ПОЧЕМУ НАЧАЛОСЬ РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ?

Наше повествование о длительной эволюции научных представлений о закономерностях окружающего мира приблизилось под занавес к моменту, который можно считать, пожалуй, наиболее тонким; он не только не может быть представлен в наглядных образах, но и на абстрактном уровне понять его достаточно трудно без специальной подготовки. Речь пойдет о том, что же происходило буквально в первые мгновения Большого Взрыва. О том, что, по большому счету, обусловило тот мощный начальный импульс, благодаря которому Вселенная начала затем расширяться, преодолевая гравитационное притяжение. В § 15.4 мы рассмотрели вопрос о том, *как* происходило расширение Вселенной. Теперь хотелось бы рассмотреть вопрос: *Почему* началось расширение Вселенной? Что послужило причиной начала ее расширения?

Прежде всего отметим, что, вводя в 1900 году в науку свою знаменитую постоянную h , *Макс Планк* тогда же обратил внимание на одно интересное обстоятельство. Он отметил, что, добавив к постоянной h постоянную тяготения G и скорость света c , можно составить величины, имеющие размерности длины, времени, плотности:

$$l_0 = \sqrt{Gh/c^3} \approx 10^{-33} \text{ см}, \quad (6)$$

$$t_0 = l_0/c \approx 10^{-43} \text{ с}, \quad (7)$$

$$\rho_0 = c^5/(G^2 h) \approx 10^{93} \text{ г/см}^3. \quad (8)$$

Эти величины называют ныне, соответственно, *планковской длиной* (l_0), *планковским временем* (t_0), *планковской плотностью* (ρ_0). Макс Планк не занимался космологическими проблемами и не предполагал, что величины l_0 , t_0 , ρ_0 станут почти столетие спустя играть важную роль при рассмотрении наиболее тонких вопросов космологии. Но интуитивно он чувствовал важность этих величин, которые, как он отмечал, «не зависят от выбора тех или иных веществ и должны сохранять свое значение для всех времен и для всех культур, в том числе и внеземных» и которые «можно было бы ввести в качестве *естественных единиц измерения*».

Сегодня планковские константы рассматриваются в физике в качестве предельных величин. Именно на расстояниях порядка планковской длины перестает работать общая теория относительности. Предполагается, что планковская плотность есть максимально возможная в

природе плотность материи и что при такой плотности пространство и время разбиваются на «кванты», характеризующиеся протяженностью 10^{-33} см и длительностью 10^{-43} с. Это означает, что расстояния меньше 10^{-33} см и промежутки времени меньше 10^{-43} с оказываются лишены смысла. Такое состояние Вселенной называют *сингулярным*. Именно из этого состояния и начала развиваться Вселенная 15 миллиардов лет назад.

Экстраполируя график на рисунке 3 в таблице 35 до $t = 10^{-43}$ с, приходим к температуре порядка 10^{32} К. При такой температуре и при плотности $\rho_0 = 10^{93}$ г/см³ все четыре фундаментальных взаимодействия были объединены и не отличались друг от друга. Точнее говоря, существовало некое *единое взаимодействие*. Затем *гравитационное взаимодействие отделилось*, и до $t = 10^{-35}$ с длилась так называемая *эра Великого объединения* — когда оставались объединенными три взаимодействия: сильное, электромагнитное, слабое. Эра Великого объединения сопровождалась так называемой *инфляцией* — суперграндиозным событием, которое как раз и явилось причиной, предопределившей расширение Вселенной. Эру Великого объединения называют также *эрой инфляции*. По окончании этой эры *отделилось сильное взаимодействие* — и началась *эпоха адронов* (хотя сами адроны образовались из кварков, как мы уже отмечали, «значительно позднее» — вблизи $t = 10^{-5}$ с). Прежде чем мы займемся инфляцией, напомним читателю, что примерно при $t = 10^{-10}$ с электрослабое взаимодействие *разделилось на электромагнитное и слабое*.

Теперь поговорим в самых общих чертах о событии, названном термином «инфляция» (от латинского *inflatio*, означающего «вздувание»). Именно это событие играет главную роль в картине Большого Взрыва. Более того, оно-то, строго говоря, и является Большим Взрывом. При сверхвысоких температуре и плотности возникло особое состояние Вселенной (его называли *вакуумоподобным*), характеризующееся *отрицательным давлением*. Не имея возможности входить в детали, заметим лишь, что состояние с отрицательным давлением обусловлено *квантовыми флуктуациями пространства–времени* (их называют *пространственно-временной пеной*). При возникновении отрицательного давления реализовалось, вместо гравитационного притяжения, *гравитационное отталкивание*. Это отталкивание, имеющее не гидродинамический (как в случае перепада давлений при химическом взрыве), а чисто гравитационный характер, сыграло роль движущей силы, заставившей Вселенную буквально в считанные мгновения расшириться (как бы «раздуться»); это и был тот «первотолчок», который обусловил дальнейшее расширение Вселенной, сопровождаемое постепенным остыванием.

Инфляция длилась какие-то мгновения (от $t = 10^{-43}$ с до $t = 10^{-35}$ с), но этого оказалось достаточно для того, чтобы расширение продолжалось по инерции в течение миллиардов лет несмотря на торможение вследствие гравитационного притяжения.

Идея возникновения вакуумоподобного состояния при наличии соответствующих экстремальных условий, была высказана в 1972 году российскими физиками *Давидом Абрамовичем Киржницем* (1926–1998) и *Андреем Дмитриевичем Линде* (род. 1943 г.). Затем она была развита применительно к космологии в работах *А.Д. Линде* и *А.А. Старобинского* в СССР, *Алана Гута*, *Пола Стейнхарда*, *Андреаса Альбрехта* в США, *Стивена Хокинга* в Великобритании. Все эти работы отражают фактически начальный этап исследований эры инфляции. Лишь после создания *квантовой теории гравитации* можно будет понять, как из пространственно-временной пены родилась Вселенная. Пока же удовлетворимся далекой аналогией с прекрасной Афродитой, родившейся из морской пены.

Из книги А.С. Шарова и И.Д. Новикова «Человек, открывший взрыв Вселенной»: «Согласно нарисованной А.Д. Линде картине, физическое пространство–время находилось в состоянии квантовой пены с плотностью, близкой к планковской. В возникающих из пены «пузырях» происходили квантовые флуктуации, и в то же время происходило их раздувание из-за гравитационного отталкивания. Большая часть объемов «пузырей» тут же возвращалась из-за флуктуации в состояние «пены». В малой части объема могло продолжаться раздувание и проявление квантовых флуктуаций плотности вакуумоподобного состояния. Очень малая доля первоначального объема после длинной цепочки случайных флуктуаций могла иметь плотность вакуумоподобного состояния, заметно меньшую, чем ρ_0 . Теперь амплитуда квантовых флуктуаций была уже не так велика. Эти объемы продолжали систематически раздуваться, превращаясь после распада вакуумоподобного состояния в горячие вселенные.

В одной из таких вселенных и находимся мы. Можно сказать, что происходит вечное рождение Вселенной из флуктуации (или, если угодно, рождение многих вселенных), вечное воспроизводство Вселенной самой себя. *У такого мира в целом нет начала и не будет конца. Он вечен и юн одновременно. Это — картина взрывающейся Вечности.*

При рождении новых минивселенных из вакуумной пены происходят, вероятно, флуктуации всех физических параметров, включая размерность пространства и времени, и флуктуации самих физических законов. Итак, возможно, *природа «пыталась» несчетное число раз создавать вселенные с самыми разными свойствами.* Мы живем в «наиболее удачном» (для нас) экземпляре этого вечного творения. Но надо помнить, что «наша Вселенная» не является ни наиболее типичной, ни наиболее вероятной частью мира. Таков ответ современной науки на вопрос Эйнштейна о возможности совсем иных миров. Открытая Э. Хабблом взрывающаяся

Вселенная, казавшаяся еще недавно «всей Вселенной», невообразимо сложной и не поддающейся человеческому воображению, *оказалась ничтожной песчинкой в более сложном потоке окружающего нас мира*» (курсив наш. — Л.Т.).

Вполне возможно, что читатель, попытавшийся вдуматься в только что приведенный отрывок из книги Шарова и Новикова, испытает легкое головокружение. Как представить себе пространственно-временную пену, из «пузырей» которой могут рождаться вселенные? На рисунке 6 в таблице 36 можно видеть, каким представляется Джону Уилеру пенящееся пространство–время. Впрочем, от такой картины головокружение может, пожалуй, только усилиться.

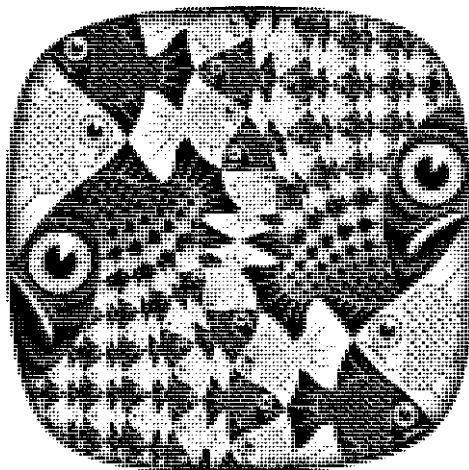
Читатель вправе поинтересоваться тем, что же было *до* момента, когда в сингулярности произошел Большой Взрыв. Проще говоря, *что же было до Большого Взрыва?* Вероятно, читатель удивится, если сказать ему, что такой вопрос, по сути дела, не имеет смысла, а потому и не требует ответа. Ведь вблизи сингулярности теряет смысл понятие самого времени (времени как такового). Вблизи сингулярности фантастически велико тяготение и поэтому время «выступает» здесь *не само по себе, а в теснейшей связи с пространством и материей*. В § 14.6 мы отмечали, что процессы в космическом корабле, влетающем в черную дыру, протекают *вне времени* внешнего наблюдателя, поэтому бесполезно спрашивать последнего о том, *когда именно* корабль вошел в черную дыру. Для внешнего наблюдателя этот момент *отодвигается в бесконечность*. А теперь от черной дыры обратимся к Вселенной. Космический корабль вошел в сверхсильное гравитационное поле, а Вселенная вышла (иначе говоря, родилась) из сверхсильного гравитационного поля. Тут просматривается определенная аналогия: нет смысла спрашивать о том, что будет *после ухода в сингулярность* (поскольку время ухода отодвигается в бесконечность), и точно так же нет смысла спрашивать о том, что было *до выхода из сингулярности* (время выхода отодвигается в отрицательную бесконечность).

Обо всем этом хорошо написано в книге И.Д. Новикова «Как взорвалась Вселенная»: «Обратимся теперь от черных дыр к картине эволюции всей Вселенной. Расширение Вселенной началось с планковского времени. Здесь искривленность пространства-времени и описываемые им приливные гравитационные силы столь же велики, как и в сингулярности в черной дыре. Эта сингулярность (ее называют *космологической*) в начале расширения Вселенной во многом похожа на сингулярность внутри черных дыр. Но имеются и существенные отличия. Во-первых, космологическая сингулярность относится ко всей Вселенной, а не к какой-то части вещества, как в случае черных дыр. Во-вторых, космологическая сингулярность лежит *не в конце процесса сжатия* (как сингулярность в черных дырах), а *в начале*

процесса расширения. Сингулярность в черных дырах мы снаружи (извне черной дыры) увидеть не можем, она никак не влияет на события во Вселенной вне черной дыры. Это обстоятельство было названо английским физиком-теоретиком Р. Пенроузом принципом космической цензуры. Космологическая сингулярность, напротив, явилась истоком всех процессов в расширяющейся Вселенной. Все, что мы видим сегодня, является следствием космологической сингулярности» (курсив наш. — Л.Т.).

Сравнивая коллапс черной дыры и Большой Взрыв, известный российский физик-теоретик *Яков Абрамович Смородинский* отмечал: «Между задачей о черной дыре и задачей о Большом Взрыве есть большое сходство. Если черная дыра кончает свое существование в сингулярности, то, повернув в ее истории время, мы получим модель Вселенной, которая в сингулярности рождается. Но между черной дырой и Вселенной есть принципиальная разница. Точнее, есть различие между положением наблюдателя в одном и другом случае. Коллапс черной дыры мы наблюдаем снаружи, и теория говорит, что для внешнего наблюдателя время полного коллапса (время достижения сингулярности) бесконечно велико. Строго говоря, наблюдатель никогда не увидит конца эволюции черной дыры. Во Вселенной же наблюдатели всегда находятся внутри, они разбегаются вместе с галактиками».

Надеемся, что читатель внимательно прочтет данный параграф и найдет время для того, чтобы поразмышлять. Основной вывод кратко резюмировал Стивен Хокинг: *«...Вселенная без края в пространстве, без начала и конца во времени, без каких-либо дел для Создателя»*. Ну как тут не вспомнить фразу, сказанную Лапласом Наполеону, о том, что он (Лаплас), конструируя картину Вселенной, *не нуждался в гипотезе Бога!*



ПРОБЛЕМА САМООРГАНИЗАЦИИ МАТЕРИИ КАК ВОДОРАЗДЕЛ МЕЖДУ НАУЧНЫМ И РЕЛИГИОЗНЫМ ПОДХОДАМИ К ПОСТИЖЕНИЮ ОКРУЖАЮЩЕГО МИРА

Сильней и глубже век от века
Земли и мысли торжество.
Все меньше веры в Божество
И больше веры в Человека.

Константин Фофанов (1862–1911)

Наука — это диалог человека с природой, результаты которого непредсказуемы. Кто мог бы в начале XX века подумать о нестабильных частицах, расширяющейся Вселенной, самоорганизации и диссипативных структурах?

Илья Пригожин

16.1 КЛЮЧЕВАЯ ПРОБЛЕМА — САМООРГАНИЗАЦИЯ, ИЛИ, ИНАЧЕ ГОВОРЯ, СИНЕРГЕТИКА

Читатель. Ранее мы уделили немало внимания *самопроизвольным* распадам элементарных частиц и *спонтанным* квантовым переходам. Все они являлись случайными событиями, характеризующимися определенными вероятностями. Теперь, как я понимаю, начинается разговор о *самоорганизации материи*, т. е. о ее *самопроизвольной (спонтанной)* организации, которая, очевидно, также относится к категории случайных событий или процессов, характеризующихся какими-то вероятностями. А в чем, собственно говоря, заключается *самопроизвольная организация материи*?

Автор. Это есть самопроизвольное упорядочение, самопроизвольный переход от беспорядка к порядку или, конкретнее, *самопроизвольный синтез из относительно простых структур более сложно организованных структур*.

Читатель. Насколько я помню, в предыдущей книге («Вероятность в современном обществе») приводился пример самоорганизующейся системы — гомеостата Эшби. Самоорганизация происходила на основе случайного поиска.

Автор. Проблема самоорганизации я бы назвал ключевой проблемой, проходившей красной нитью через все три книги трехтомника «Закономерности окружающего мира». В той или иной мере, под тем или иным углом зрения мы неоднократно обращались к ней в этих книгах. В первой книге («Случайность, необходимость, вероятность») данная проблема поднималась с точки зрения переходов от беспорядка к порядку, т. е. с точки зрения конструктивных процессов в окружающем мире (см. тему 2: «Порядок и беспорядок»). Древней парадигме, согласно которой возникновение Солнца и планет есть Божественный акт Сотворения мира, была противопоставлена современная научная парадигма, согласно которой следует говорить не о Божественном акте, а о *естественном* процессе. В этом процессе происходило то, что часто называют отбором информации из шума; здесь порядок и закономерность формировались из массы случайностей в соответствии с представлениями теории вероятностей. Уместно напомнить, что в теме 7 («Частота и вероятность») отмечалась внутренняя конструктивность хаоса (наличие глубинного порядка в хаосе), которую можно наглядно продемонстрировать на примере таблицы случайных чисел. Во второй книге («Вероятность в современном обществе»), где большое внимание было уделе-

но информации и энтропии, самоорганизация выступала в облике антиэнтропийных (информационных) процессов, противостоящих энтропийным процессам. В частности, там обсуждалась эволюция жизни на Земле, рассматривавшаяся как глобальный антиэнтропийный процесс. В третьей книге («От динамических закономерностей к вероятностным») факт грандиозной самоорганизации материи был продемонстрирован на основе рассмотрения современных представлений об эволюции Вселенной после Большого Взрыва.

Читатель. Факт существования антиэнтропийных процессов и, следовательно самоорганизации материи не подлежит сомнению. Однако эти процессы не согласуются с таким фундаментальным законом как закон возрастания энтропии.

Автор. О законе возрастания энтропии у нас был, как Вы наверняка помните, обстоятельный разговор во второй книге. Подчеркивалось, что этот фундаментальный закон работает в *замкнутых* системах, но он не обязан выполняться в системах *открытых*. Напомню соотношение (18) из § 9.5: $\Delta S = \Delta S_{\text{внутр}} + \Delta S_{\text{внеш}}$. Приращение энтропии ΔS открытой системы состоит из двух слагаемых: энтропии, которая *производится внутри системы* при необратимых процессах (слагаемое $\Delta S_{\text{внутр}}$), и энтропии, *поступающей в систему из внешней среды* в процессе передачи теплоты (слагаемое $\Delta S_{\text{внеш}}$). Но внешняя среда может не только *добавлять* энтропию в открытую систему, но и наоборот, *отбирать* энтропию у системы. Иными словами, $\Delta S_{\text{внеш}}$ может оказаться отрицательной величиной. Поэтому ΔS может стать меньше нуля, что как раз и соответствует самоорганизации системы.

Читатель. Значит, все дело в том, является ли система открытой?

Автор. *Открытость системы* — необходимое условие ее самоорганизации. Необходимое, но не достаточное. Система должна быть *достаточно сложной и термодинамически неравновесной*. Вопрос о том, каковы должны быть условия самоорганизации систем различной природы (физических, химических, биологических и др.), впервые рассмотрел профессор Штутгартского университета *Герман Хакен* (род. 1927 г.). В 1973 году он предложил назвать рождающееся научное направление *синергетикой* (от греческих «син» — «совместно» и «эргос» — «действие»). Такое название должно было подчеркивать, что речь идет об изучении процессов самоорганизации, которые возникают в сложных системах в результате *согласованного взаимодействия (кооперации)* составляющих частей. В 1977 году вышла в свет монография Г. Хакена «Синергетика», представляющая собой первую попытку систематического изложения широкого круга вопросов, связанных с самоорганизующимися системами

(пер. с англ. — М.: «Мир», 1980). Одновременно проблемой самоорганизации начала заниматься группа ученых Брюссельского университета, возглавляемая известным физиком и физико-химиком *Ильей Романовичем Пригожиным* (род. 1917 г.). В соавторстве с Г. Николисом он написал монографию «Самоорганизация в неравновесных системах» (пер. с англ. — М.: «Мир», 1979). Заметим, что И.Р. Пригожин считается одним из создателей *термодинамики необратимых процессов*, являющейся основой современной науки о самоорганизации систем.

16.2 САМООРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМ КАК ФЕНОМЕН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР

Читатель. Нельзя ли вкратце познакомиться с основными идеями Пригожина, связанными с самоорганизацией систем?

Автор. Основной тезис Пригожина: *при удалении от равновесия в системе могут возникать организованные состояния, обнаруживая новый порядок*. Эти организованные состояния Пригожин назвал *диссипативными структурами*.

Читатель. Я знаю, что в переводе с латинского «диссипация» означает «рассеяние». Говорят, что *энергия диссипирует* (рассеивается), когда она теряет качество, превращаясь в тепловую энергию. Какое отношение имеет диссипация энергии к организованным структурам, возникающим в неравновесных системах?

Автор. Самое прямое. Коль скоро эти структуры возникают *вдали от термодинамического равновесия*, то для их поддержания необходима постоянная и значительная подпитка энергией извне. Получая много энергии извне, данные состояния активно рассеивают ее, превращая в тепло. Вполне понятно, что возникновение нового порядка в неравновесной системе обходится недешево.

Читатель. Но благодаря чему образуются эти организованные состояния? Какие факторы обуславливают возникновение диссипативных структур?

Автор. В том-то и дело, что никаких внешних факторов здесь не требуется. Диссипативные структуры возникают в полном смысле слова *самопроизвольно*. Их порождают *флуктуации*, происходящие в системе. «Фундаментальное свойство неравновесных систем, — отмечает Пригожин, — проявляется в способности переходить в упорядоченное состояние в результате флуктуации, т. е. осуществлять *«порядок через*

флуктуации». Одно из наиболее глубоких следствий неравновесной термодинамики проявляется в дуалистичности необратимого процесса: как разрушителя порядка вблизи равновесия и как создателя порядка вдали от равновесия».

Читатель. Получается, что первопричина самоорганизации — это неравновесность системы и флуктуации, т. е., иными словами, это *необратимость и случайность*?

Автор. Именно так. Пригожин постоянно подчеркивает, что *«искусственное может быть жестко детерминированным и обратимым, тогда как естественное непременно содержит случайность и необратимость»*.

Чтобы Вы могли лучше понять идеи Пригожина, познакомьтесь с написанной на большом эмоциональном подъеме книгой И.Р. Пригожина и И. Стенгерс «Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой» (пер. с англ. — М.: «Прогресс», 1986). Там, в частности, есть следующие строки: «Ныне мы знаем, что вдали от равновесия могут *спонтанно возникать* новые типы структур. В *сильно неравновесных* условиях может совершаться переход от беспорядка, теплового хаоса, к порядку. Могут возникать новые динамические состояния материи, отражающие взаимодействие данной системы с окружающей средой. Эти новые структуры мы назвали диссипативными структурами... Мы подробно обсуждаем понятия, позволяющие описывать образование диссипативных структур, например понятия *теории бифуркаций*. Следует подчеркнуть, что вблизи точек бифуркации в системах наблюдаются значительные флуктуации. Такие системы как бы «колеблются» перед выбором одного из нескольких путей эволюции, и знаменитый закон больших чисел, если понимать его как обычно, перестает действовать. *Небольшая флуктуация может послужить началом эволюции в совершенно новом направлении, которое резко изменит все поведение макроскопической системы*» (курсив наш. — Л.Т.).

Читатель. «Бифуркация» — это «разделение, вилообразное раздвоение». Что означают бифуркации у Пригожина?

Автор. Пожалуй, имеет смысл привести выдержку из написанного Олвином Тоффлером предисловия к книге «Порядок из хаоса». Оно многое поясняет и попутно разъясняет, в каком смысле используется здесь понятие бифуркации. Вот эта выдержка.

«...Все системы содержат подсистемы, которые непрестанно *флуктуируют*. Иногда отдельная флуктуация или комбинация флуктуаций может стать (в результате положительной обратной связи) настолько сильной, что существовавшая прежде организация не выдерживает и разрушается. В этот *переломный момент* (который авторы книги называют *особой точкой* или *точкой бифуркации*) принципиально

невозможно предсказать, в каком направлении будет происходить дальнейшее развитие: станет ли состояние системы хаотическим или она перейдет на новый, более дифференцированный и более высокий уровень упорядоченности, который авторы называют *диссипативной структурой*. Один из ключевых моментов в острых дискуссиях, развернувшихся вокруг понятия диссипативной структуры, связан с тем, что Пригожин подчеркивает возможность *спонтанного* возникновения порядка и организации из беспорядка и хаоса в результате процесса *самоорганизации*... Необратимые процессы оказываются источником порядка (отсюда и название книги — «Порядок из хаоса»). Тесно связанные с открытостью системы и случайностью, необратимые процессы порождают высокие уровни организации (диссипативные структуры). Именно поэтому одним из лейтмотивов книги служит новая, весьма необычная интерпретация второго начала термодинамики, предложенная авторами. По мнению Пригожина и Стенгерс, энтропия — не просто безостановочное соскальзывание системы к состоянию, лишенному какой бы то ни было организации. При определенных условиях энтропия становится прародительницей порядка.

...Авторы прослеживают, каким образом необходимость и случайность великолепно согласуются, дополняя одна другую. Они считают, что в точке бифуркации принципиально невозможно предсказать, в какое состояние перейдет система. Случайность подталкивает систему на новый путь развития, а после того как путь (один из возможных) выбран, вновь вступает в силу детерминизм — и так до следующей точки бифуркации».

Читатель. Но если случайность играет роль лишь в точке бифуркации, а в промежутке между последовательными бифуркациями все развивается жестко детерминированно, то не означает ли это, что *в целом* имеется жестко детерминированная схема, в которую введены отдельные случайные события?

Автор. Это было бы так, если бы мы знали заранее, когда произойдет следующая (очередная) бифуркация. Но бифуркации происходят в случайные моменты, и поэтому процесс *в целом оказывается стохастическим*.

16.3 ПРИМЕРЫ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР

Читатель. Мы говорили о диссипативных структурах в общих чертах. Хотелось бы познакомиться с конкретными примерами таких структур.

Автор. Некоторые из примеров представлены на рисунках в таблице 37. На рисунке 1 дан предполагаемый вид нашей Галактики, если посмотреть на нее из точки, находящейся на перпендикуляре к плоскости Галактики, проведенном через ее центр. Некогда хаотичное водородное облако спонтанно преобразовалось в гигантскую диссипатив-

ную структуру — скопление звезд, организованное в виде весьма симметричной спирали. Другой пример диссипативной структуры — показанный на рисунке 2 колоссальный атмосферный вихрь, образующий на поверхности Юпитера так называемое *Большое Красное Пятно*.

Читатель. Простите, разве вихрь можно называть *структурой*?

Автор. Структура в общем случае не обязана быть статичной. Вихрь в виде Большого Красного Пятна — это организованное неравновесное состояние, которое астрономы наблюдают в телескопы вот уже 300 лет. Он имеет форму эллипса размерами 15×30 тысяч километров. А вот вполне статичную диссипативную структуру Вы можете видеть на рисунке 3. Это третий пример самоорганизации — *облачность*. Все, кто летал на самолете над облаками, могли неоднократно наблюдать регулярную структуру облаков в виде параллельных валов, прямолинейных «улиц». Весь этот геометрический порядок образовался из хаоса молекулярных движений, разнообразных возмущений в атмосфере, вызываемых неравномерностью ее прогрева, приводящей к интенсивной конвекции. Особенно интересен четвертый пример — т. н. *неустойчивость Бенара* (это явление было обнаружено Г. Бенаром еще в 1900 году); см. рисунок 4 в таблице 37. Явление нетрудно воспроизвести. Надо налить в обычную сковороду слой минерального масла толщиной примерно 5 мм, добавив в масло (чтобы эффект был виден отчетливее) мелкие алюминиевые опилки. Затем надо поставить сковороду на огонь. Вначале, пока перепад температуры между дном и поверхностью масла еще невелик, подводимая снизу теплота будет распространяться вверх за счет теплопроводности. При дальнейшем нагревании начнется конвекция: нагретое масло будет подниматься, охлаждаться сверху и затем опускаться вниз. Пространственное распределение двух встречных потоков (поднимающегося и опускающегося) *через некоторое время самоорганизуется* — возникает хорошо видимая на рисунке 4 упорядоченная структура (диссипативная структура), образованная шестиугольными конвекционными ячейками, т. н. *ячейками Бенара*. В центре каждой ячейки масло поднимается снизу, а по краям опускается вниз.

Читатель. По-видимому, момент, соответствующий точке бифуркации, есть в данном случае момент образования ячеистой структуры?

Автор. Конечно. При достаточно сильном нагревании неожиданно наступает тот критический момент, когда какая-то флуктуация, микроскопическая конвекция *вдруг необычайно усиливается и завладевает всей системой*. «Таким образом, — отмечает Пригожин, — спонтанно устанавливается новый молекулярный порядок. Он соответствует гигантской флуктуации, стабилизируемой обменом энергией с внешним миром.

Таблица 37. Примеры самоорганизации (диссипативные структуры)

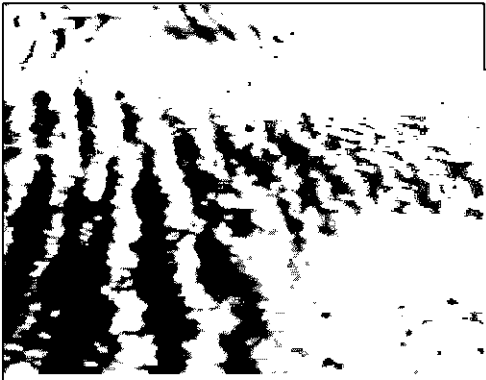
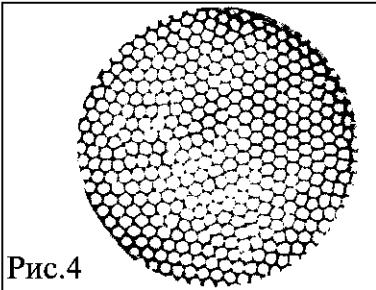
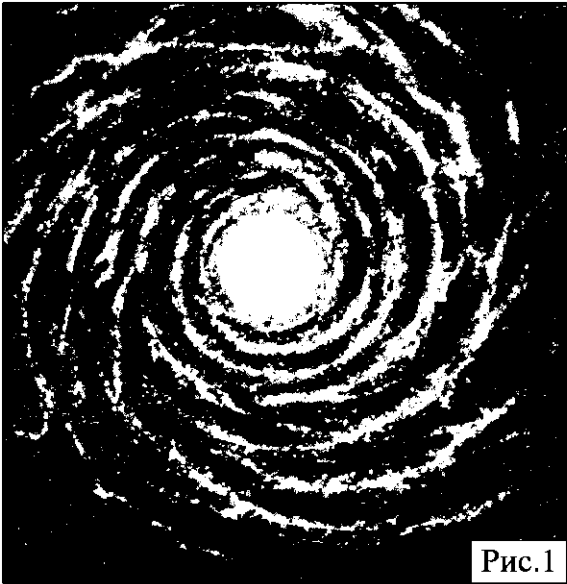
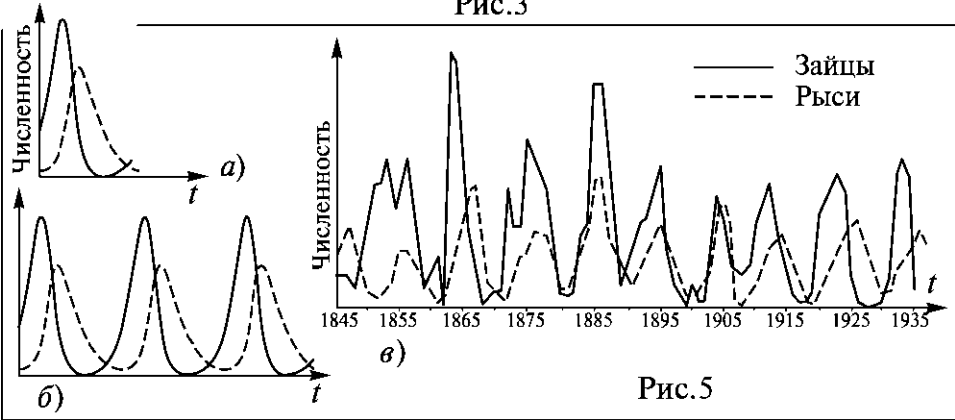


Рис.3



Теперь миллионы молекул движутся *согласованно*, образуя конвективные ячейки в форме правильных шестиугольников некоторого характерного размера».

Читатель. Удивительно! Поступление в систему теплоты, а вместе с ней и энтропии привело не к увеличению беспорядка, а напротив, к возникновению порядка! Действительно, энтропия оказывается здесь не разупорядочивающим фактором, а «прародительницей порядка».

Автор. Еще больше впечатляет пятый пример — *химические часы* (он не представлен в таблице 37).

Читатель. Впервые слышу о подобных часах.

Автор. У этого примера поучительная история. В 1951 году работавший в то время в Институте биофизики в Москве химик-экспериментатор *Борис Павлович Белоусов* принес в один из химических журналов свою статью под названием «Периодически действующая реакция и ее механизм». Статья вызвала недоумение. Ведь всем известно, что при заданных реагентах химическая реакция протекает необратимо в определенную сторону, так что «периодически действующие реакции» просто невозможны. А потому статью вернули автору, нисколько не догадываясь, что в ней заключалось большое открытие. Белоусов продолжил свои химические опыты и воочию наблюдал поистине удивительные вещи. Вот стоит колба с бесцветной жидкостью. В нее опускают щепотку некоего вещества — жидкость окрашивается в синий цвет. И вдруг на ваших глазах цвет всей жидкости в колбе из синего становится красным. Но это еще не все! Через несколько минут красный цвет сменяется синим. Потом снова *через те же несколько минут* раствор становится красным... Ну чем не химические часы? Белоусов переработал и дополнил первоначальную статью и снова понес ее в журнал, приложив фотографии. Но рецензенты и на этот раз не приняли всерьез представленные материалы и предложили Белоусову теоретически объяснить механизм реакции, которую он якобы наблюдал. Надо сказать, что как раз в то время математическая модель соответствующего процесса была предложена английским математиком *Аланом Тьюрингом* (1912–1954). Но Белоусов о Тьюринге не слышал, а Тьюринг не знал об экспериментах Белоусова. В итоге блестящая работа Белоусова так и осталась неопубликованной. В 1959 году молодой биофизик *А.М. Жаботинский* описал целый ряд химических процессов, подобных реакции Белоусова. Лишь после этого они получили признание и стали позднее (уже после кончины Белоусова) именоваться реакциями *Белоусова–Жаботинского*. Сегодня этот эффект называют кратко химическими часами, а более строго *образованием волнообразных пространственно-временных диссипативных структур*.

Читатель. Я представляю себе химическую реакцию так: в разных направлениях в пространстве хаотически движутся молекулы реагентов и случайным образом сталкиваются друг с другом. Казалось бы, такая картина исключает самоорганизацию — ведь столкновения молекул происходят *независимо друг от друга*. Но строго периодическое изменение цвета во всем объеме колбы говорит о *коллективном действии всех молекул* и тем самым свидетельствует о факте самоорганизации. В это просто не верится.

Автор. Раскроем еще раз книгу «Порядок из хаоса». Читаем:

«Предположим, что у нас имеются молекулы двух сортов: «красные» и «синие». Из-за хаотического движения молекул можно было бы ожидать, что в какой-то момент в левой части сосуда окажется больше красных молекул, в следующий момент больше станет синих молекул и так далее. Цвет реакционной смеси с трудом поддается описанию: фиолетовый с беспорядочными переходами в синий и красный. Иную картину мы видим, разглядывая химические часы: *вся реакционная смесь будет иметь синий цвет, затем ее цвет резко изменится на красный, потом снова на синий и т. д.* Поскольку смена окраски происходит через *правильные интервалы времени*, мы имеем дело с когерентным процессом.

Столь высокая упорядоченность, основанная на согласованном поведении миллиардов молекул, кажется неправдоподобной, и, если бы химические часы нельзя было наблюдать «во плоти», вряд ли кто-нибудь поверил, что такой процесс возможен. Для того чтобы одновременно изменить свой цвет, молекулы должны «каким-то образом» поддерживать связь между собой. *Система должна вести себя как единое целое.* Возможно, что именно диссипативные структуры представляют собой один из физических механизмов связи».

Заметим, что в последнее время обнаруживают все больше подобных процессов. Их называют *автоволнами*. Любопытно, что биение сердца, как оказалось, поддерживается целым комплексом осциллирующих химических реакций.

Читатель. Получается, что часто используемое вольное сравнение здорового сердца с часами приобретает конкретный смысл — это химические часы!

Автор. Рассмотрим еще один пример на тему самоорганизации. Теперь самоорганизующейся системой будет *совокупность зайцев и рысей*, живущих в некоторой местности, где в изобилии произрастает трава, являющаяся кормом для зайцев. Рыси питаются зайцами, а за рысами охотятся люди ради их меха. Итак, зайцы пасутся и размножаются, рыси их поедают и тоже размножаются, человек отлавливает рысей. Травы сколько угодно, поэтому численность зайцев быстро растет. Соответственно начинает расти и численность рысей, что неизбежно приводит к прекращению роста, а затем и снижению численности зайцев. Это, в

свою очередь, снижает рождаемость рысей, а поскольку человек все время отлавливает их, то вслед за снижением численности зайцев происходит и снижение численности рысей. Данная ситуация качественно показана на рисунке 5а в таблице 37. Здесь сплошной линией представлено изменение со временем численности зайцев, а пунктирной линией — численности рысей. Однако этим картина изменения численности тех и других популяций не исчерпывается. В отсутствие рысей зайцы снова начинают бурно размножаться — и все повторяется. В результате возникает периодичность в изменении численности популяций со временем (см. рисунок 5б). Эта периодичность оказывается вполне строгой и в известном смысле аналогична химическим часам. На рисунке 5в показано, как в период с 1845 года по 1935 год изменялись численности рысей и зайцев-беляков по данным, полученным североамериканской компанией «Хадсон Бей». Налицо качественное соответствие экспериментальных кривых на рисунке 5в с теоретическими кривыми на рисунке 5б.

16.4 ДВА ПРИНЦИПИАЛЬНО РАЗНЫХ ПОДХОДА К ПОСТИЖЕНИЮ МИРА: НАУЧНЫЙ И РЕЛИГИОЗНЫЙ

Читатель. Приведенные примеры, конечно, убедительны. Тем не менее, как мне кажется, идея спонтанной организации, *не нуждающейся во внешнем управляющем факторе*, до сих пор не является общепризнанной. Особенно когда речь идет о проблеме *глобальной* самоорганизации — о возникновении жизни на Земле или, более того, о возникновении расширяющейся Вселенной.

Автор. Это верно. Как отмечал Пригожин, «многие ученые с готовностью объясняют космологическую сингулярность вмешательством «Божьего промысла» или триумфом библейской версии сотворения мира, а целью науки объявляют реконструкцию акта, трансцендентного по отношению к физической реальности». Только подумать: в начале XXI столетия глобальный акт самоорганизации материи пытаются подменить Божественным актом, а современной науке предлагается этот Божественный акт обосновать! Какая нелепость!

Читатель. Но этой нелепости придерживаются многие современные ученые, не говоря уже о широкой публике.

Автор. С одной стороны достижения науки, убедительно объясняющие спонтанную организацию материи через случайность и необратимость.

С другой стороны старозаветные догматы, утверждающие, что синтез организованных состояний происходит не путем самоорганизации материи, а «по воле Творца». Проблема самоорганизации материи (эта проблема заключается в *признании или отрицании самоорганизации*) оказывается водоразделом между двумя принципиально разными подходами к постижению окружающего мира.

Читатель. О каких двух подходах Вы говорите?

Автор. Один подход — это *научный* подход, многократно проверенный экспериментальными исследованиями и наблюдениями. Этот подход предлагает вывод: окружающий мир самоорганизовался из хаотического состояния в процессе расширения Вселенной. Методология такого подхода основана на диалектике необходимого и случайного, выражаемой математически через вероятность. Воспользовавшись известным изречением поэта, можем сказать, что здесь Случай выступает в роли «Бога-изобретателя».

Читатель. Я помню это стихотворение Пушкина:

О, сколько нам открытий чудных
Готовят просвещенья дух
И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг,
И случай, Бог-изобретатель...

Автор. Другой подход — это *религиозный* подход, исходящий из того, что окружающий мир не самоорганизовался, а сотворен Творцом, по сути дела гипотетическим. При таком подходе фактически игнорируется и «просвещенья дух», и «опыт, сын ошибок трудных». Здесь не нужны парадоксальные, на первый взгляд, озарения человеческого гения. Вместо всего этого *слепая вера в набор неких догматов*. Вполне очевидно, что второй подход *психологически комфортнее* первого подхода, поскольку он избавляет человека от участия в диалектически противоречивом процессе познания и предлагает ограничиться принятием на веру ряда догматов. Спокойнее жить, памятуя лукавую заповедь Екклесиаста о том, что «во многой мудрости много печали, и кто умножает познания, умножает скорбь».

Читатель. А может быть, никакого водораздела, по большому счету, не существует? Разве нельзя считать, что научный и религиозный подходы к постижению мира *дополняют друг друга*?

Автор. Подобная точка зрения нередко высказывается в наше время. Ее пытаются обосновать утверждением, что верующему желательно подкрепить свои убеждения научной логикой, а ученому — верой. При этом, однако, забывают, что по самой своей сути религиозная вера не

нуждается в научной логике, ибо основана на догматах, сомневаться в которых запрещено и которые не требуется чем-либо подкреплять, тогда как ученому просто нечего делать с религиозной верой, коль скоро основой его профессиональной деятельности являются как раз сомнения и связанный с ними поиск доказательств и обоснований. Я наткнулся в книге Я.Н. Данько «Проблемы происхождения жизни: научные аспекты» (Сумы: «Университетская книга», 2001) на весьма здоровое утверждение: *«Религия и наука в норме не пересекаются. Если же столкновение происходит, то страдают обе: наука теряет объективность, религия — субъективность. Не может быть научного доказательства или опровержения истинно религиозных положений, равно как и религиозного — научных».*

Читатель. Но современные ученые нередко упоминают Бога в своих книгах и выступлениях.

Автор. Не следует воспринимать это всерьез. Тут можно было бы воспользоваться библейской заповедью, не рекомендующей «помянуть всуе имя Господне». А если говорить серьезно, то вот, например, высказывание выдающегося российского физика-теоретика академика *Виталия Лазаревича Гинзбурга* (род. 1916 г.): «Научное мышление и вера в Бога совершенно несовместимы, если Бог привлекается в качестве «объяснения» каких-то процессов или явлений. Происхождение жизни, эволюция Вселенной, да и любые другие естественнонаучные проблемы являются предметом научного изучения, и шаг за шагом мы узнаем о них все больше и больше в результате наблюдений, экспериментов и их анализа. Привлекать здесь Бога, сказав, например, что Бог создал живые существа, значит, по существу, капитулировать, отказаться от научного подхода к вопросу о происхождении и эволюции живых организмов. Как я убежден, мода пройдет, многовековой процесс освобождения общества от религии, в конце концов, пусть не очень скоро, победит. *Будущее принадлежит не мистике, таинствам и вере, а научному мышлению и научному мировоззрению»* (курсив наш. — Л.Т.).

16.5 ПРАВОМЕРНО ЛИ РАССМАТРИВАТЬ БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ КАК БОЖЕСТВЕННЫЙ АКТ?

Читатель. Я, конечно, за научный подход, научное мышление, научное мировоззрение. Однако, согласитесь, Большой Взрыв весьма похож на Божественный акт Сотворения мира. Вселенная отсутствовала, и

вот 15 миллиардов лет назад она была сотворена. С точки зрения верующего человека, открытый современной наукой феномен Большого Взрыва как раз и доказывает Божественный акт Сотворения мира. Разве не может верующий человек, говоря о происхождении Вселенной, сослаться именно на выводы современной науки?

Автор. Строго говоря, такая ссылка неправомерна. Современная наука показала, что у Вселенной *нет краев*; расширение Вселенной — это есть, по сути дела, расширение *пространства Вселенной*. Бог должен был бы в момент Творения пребывать где-то вне пространства. Иными словами, он должен был бы *нигде не пребывать*! Повторяя вслед за Стивенном Хокингом, что «бессмысленно говорить о пространстве и времени за пределами Вселенной», мы должны заключить, что Бог должен был бы с самого начала находиться *внутри* создаваемой им Вселенной и прежде всего в изначальной сингулярности.

Читатель. А почему бы не допустить, что Бог может быть вне пространства, а значит, и вне сингулярности?

Автор. Это означало бы, что он являлся внешним наблюдателем по отношению к космологической сингулярности.

Читатель. Вот он и наблюдал бы за результатами своего творчества. Иначе как бы он мог заключить, что «это хорошо»?

Автор. В таком случае, согласно современной науке (я имею в виду созданную Эйнштейном общую теорию относительности), момент рождения Вселенной должен был бы отодвинуться для Бога в отрицательную бесконечность; это означает, что для Бога акт творения никогда не состоится, и он не сможет убедиться, что «это хорошо» (напомним упоминавшийся в § 15.6 принцип космической цензуры Пенроуза). Точно так же внешний наблюдатель никогда не увидит, как подлетающий к черной дыре космический корабль провалится в нее. По Эйнштейну, выход материи из сингулярности отодвигается по времени для внешнего наблюдателя в отрицательную бесконечность, тогда как уход материи в сингулярность отодвигается для него в положительную бесконечность.

16.6 О РЕЛИГИОЗНОМ ЧУВСТВЕ ЭЙНШТЕЙНА

Читатель. Однако, как хорошо известно, Эйнштейн многократно обращался к Богу. Он заявлял, что «Бог не играет в кости». Он задавался вопросом: «Мог ли Бог создать мир иным?» Как нам к этому относиться?

Автор. Прежде всего поговорим об эйнштейновской фразе «Бог не играет в кости». Допустим на минуту, что Бог есть и что он «не играет в кости». Однако эволюция сотворенной им Вселенной органически связана с принципиально вероятностной физикой элементарных частиц, а потому и сама в основе своей вероятностна. Налицо неувязка, если, конечно, полагать, что Бог есть, и что он действительно «не играет в кости» Именно в кости он как раз и играет. Впрочем, следует иметь в виду, что Бог у Эйнштейна — это не некий Творец, а сама Природа.

Читатель. Верующие могут не согласиться с Вашим последним утверждением относительно того, как понимал Бога Эйнштейн.

Автор. В таком случае обратимся к самому Эйнштейну. У него есть работа, озаглавленная «Религия и наука». Из нее трудно сделать вывод о том, что Эйнштейн отличался религиозностью. Вот отдельные фразы из этой работы: «науку и религию по очевидной причине придется считать непримиримыми противоположностями», «этическое поведение человека должно основываться на сочувствии, образовании и общественных связях; никакой религиозной основы для этого не требуется», «нетрудно понять, почему церковь различных направлений всегда боролась с наукой и преследовала ее приверженцев».

Читатель. Однако, как я слышал, Эйнштейн говорил о некоем *космическом религиозном чувстве*, полагая его весьма важным для ученого.

Автор. Верно. В той же работе «Религия и наука» он писал: «Я утверждаю, что космическое религиозное чувство является сильнейшей и благороднейшей из пружин научного исследования». И там же: «Религиозные гении всех времен были отмечены этим космическим религиозным чувством, *не ведающим ни догм, ни Бога, сотворенного по образу и подобию человека*» (курсив наш. — Л.Т.). Следует подчеркнуть, что под космическим религиозным чувством ученый понимал не веру в Бога, а веру в *возможность постижения человеческим разумом закономерностей окружающего мира*. «Вечная загадка мира — это его познаваемость, — говорил Эйнштейн. — Сам факт этой познаваемости представляется чудом». О сущности космической религиозности Эйнштейна можно судить по его речи «Мое кредо», опубликованной «Лигой человеческих прав» в 1932 году. Приведем заключительные слова этой речи:

«Самое прекрасное и глубокое переживание, выпадающее на долю человека, — это ощущение таинственности. Оно лежит в основе религии и всех наиболее глубоких тенденций в искусстве и науке. Тот, кто не испытал этого ощущения, кажется мне, если не мертвецом, то во всяком случае слепым. Способность воспринимать то нецеликом постижимое для нашего разума, что скрыто под непосредственными переживаниями, чья красота и совершенство доходят до нас лишь в виде косвенного

слабого отзвука, — *это* и есть религиозность. В *этом* смысле я религиозен. Я довольствуюсь тем, что с изумлением строю догадки об этих тайнах и смиренно пытаюсь мысленно создать далеко не полную картину совершенной структуры всего сущего».

Читатель. Получается, что слухи о глубокой религиозности Эйнштейна несколько преувеличены?

Автор. Это относится не только к Эйнштейну, но и к большинству выдающихся ученых. Так называемое «космическое религиозное чувство» к собственно религии отношения фактически не имеет. Заметим, что пользовавшаяся признанием среди ученых XVIII–XIX столетий философия деизма (см. § 3.4) также имела мало общего с собственно религией. Когда ученый занимается профессионально своим делом, он не нуждается ни в каком Боге.

16.7 Так ли много печали во mnogой мудрости?

Читатель. Приходится согласиться с тем, что существует непреходимая граница (водораздел) между научным и религиозным подходами к постижению мира и что эта граница определяется признанием или отрицанием самоорганизации материи. Научный подход предполагает признание самоорганизации материи и пытается ее объяснить; религиозный подход отрицает самоорганизацию материи. Но может быть, это обстоятельство не должно вызывать особого беспокойства?

Автор. Что Вы хотите этим сказать?

Читатель. Может быть, следует предоставить людям самостоятельно определяться, по какую сторону от упомянутой выше границы им находиться? Пусть одни постигают мир через научное познание, а другие через религиозные откровения? Что в этом плохого?

Автор. Библия утверждает, что «во mnogой мудрости много печали и кто умножает познания, умножает скорбь». Однако так ли уж много печали во mnogой мудрости? И не чаще ли оборачивается скорбью как раз недостаток мудрости, пренебрежение познанием?

Читатель. Мне кажется, что все эти вопросы ставились в истории человечества много раз и столько же раз не получали определенного ответа.

Автор. Думаю, что в *наше время*, когда благодаря развитию научного познания человечество вступило в век высоких информационных технологий, когда познания в сфере микроявлений удивительным образом

интегрируются с познаниями в космологической сфере, — в это время ответ на поставленные выше вопросы становится вполне очевидным. Сегодня религиозный подход к постижению мира не может помочь человеку активно вписаться в существующий динамичный мир, поскольку не может дать ему адекватного представления об этом мире; такой подход, образно говоря, выбрасывает человека на обочину реальности.

Читатель. С этим трудно не согласиться.

Автор. Илья Пригожин заметил: «Человечество достигло поворотного пункта — возникновения новой рациональности, в которой наука более не отождествляется с определенностью, а вероятность — с незнанием». Таков, возможно, главный на сегодня итог научного подхода к постижению мира. И итог этот обещает новые открытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Популярные издания

1. *Я.Б. Зельдович, М.Ю. Хлопов.* Драма идей в познании природы. М.: Наука, 1988.
2. *Л.И. Пономарев.* Под знаком кванта. М.: Советская Россия, 1984.
3. *М. Гарднер.* Теория относительности для миллионов. Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1965.
4. *А.Д. Чернин.* Физика времени. М.: Наука, 1987.
5. *Л.Б. Окунь.* α , β , γ , ... Z: элементарное введение в физику элементарных частиц. М.: Наука, 1985.
6. *Л.М. Мухин.* Мир астрономии. М.: Молодая гвардия, 1987.
7. *Е.П. Левитан.* Эволюционирующая Вселенная. М.: Просвещение, 1993.
8. *Д. Рюэль.* Случайность и хаос. Пер. с франц. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
9. *Г.Я. Мякишев.* Элементарные частицы. М.: Наука, 1979.
10. *В.И. Григорьев, Г.Я. Мякишев.* Силы в природе. М.: Наука, 1977.
11. *О.П. Мороз.* В поисках гармонии. М.: Атомиздат, 1978.
12. *И.Д. Новиков.* Как взорвалась Вселенная. М.: Наука, 1988.
13. *А.Б. Мигдал.* Квантовая физика для больших и маленьких. М.: Наука, 1989.
14. *Р. Фейнман.* КЭД — странная теория света и вещества. Пер. с англ. М.: Наука, 1988.
15. *Р. Фейнман.* Характер физических законов. Пер. с англ. М.: Мир, 1968.
16. *А.С. Компанеев.* Что такое квантовая механика? М.: Наука, 1977.
17. *В.В. Белокуров, О.Д. Тимофеевская, О.А. Хрусталева.* Квантовая телепортация — обыкновенное чудо. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.
18. *С. Хокинг.* От Большого Взрыва до черных дыр: краткая история времени. Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
19. *М.В. Сажин.* Современная космология в популярном изложении. М.: Эдиториал УРСС, 2002.
20. *И. Пригожин.* Конец определенности: время, хаос и новые законы природы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
21. *Н.Ю. Климонтович.* Без формул о синергетике. Минск: Вышэйшая школа, 1986.
22. *Ю.М. Романовский.* Процессы самоорганизации в физике, химии, биологии. М.: Знание, 1981.
23. *И. Пригожин, И. Стенгерс.* Время, хаос, квант: к решению парадокса времени. Пер. с англ. М.: Эдиториал УРСС, 2000.
24. *В. Гейзенберг.* Шаги за горизонт. Пер. с нем. М.: Прогресс, 1987.
25. *У. Кауфман.* Космические рубежи теории относительности. Пер. с англ. М.: Мир, 1981.

26. Четыре ключа к космологии. «В мире науки», № 5, 2004.
27. *А.М. Черепашук, А.Д. Чернин.* Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино: Век 2 (Наука для всех), 2003.
28. *Л.В. Тарасов.* Современная физика в средней школе. М.: Просвещение, 1990.
29. *Л.В. Тарасов.* Этот удивительно симметричный мир. М.: Просвещение, 1982.
30. *Л.В. Тарасов.* Физика в природе. М.: Вербум-М, 2002.
31. *Л.В. Тарасов.* Лазеры: действительность и надежды. М.: Наука, 1985.

Научные издания

1. *Г.Я. Мякишев.* Динамические и статистические закономерности в физике. М.: Наука. 1973.
2. *П.С. Кудрявцев.* Курс истории физики. М.: Просвещение, 1982.
3. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.* Квантовая механика (нерелятивистская теория). М.: Наука, 1974.
4. *Д.И. Блохинцев.* Принципиальные вопросы квантовой механики. М.: Наука, 1966.
5. *Д.И. Блохинцев.* Пространство и время в микромире. М.: Наука, 1970.
6. *Б.Б. Кадомцев.* Динамика и информация. М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 1999.
7. *И. Пригожин, И. Стенгерс.* Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. Пер. с англ. М.: Прогресс, 1986.
8. *Дж. Фен.* Машины, энергия, энтропия. Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
9. *П. Эткинс.* Порядок и беспорядок в природе. Пер. с англ. М.: Мир, 1987.
10. *И. Пригожин, Д. Конденуди.* Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур. Пер. с англ. М.: Мир, 2002.
11. *Г. Хакен.* Синергетика. Пер. с англ. М.: Мир, 1980.
12. *Л.Б. Окунь.* Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1988.
13. *П.П. Гайденко.* Эволюция понятия науки: становление и развитие первых научных программ. М.: Наука, 1980.
14. *П.П. Гайденко.* Эволюция понятия науки: формирование научных программ нового времени. М.: Наука, 1987
15. *З.А. Фок.* Начала квантовой механики, М.: Наука, 1976
16. *Л.В. Тарасов.* Основы квантовой механики. М.: Высшая школа, 1978.
17. *Л.В. Тарасов.* Введение в квантовую оптику. М.: Высшая школа, 1988.
18. *Л.В. Тарасов.* Физические основы квантовой электроники. М.: Советское радио, 1976.

Учебное издание

ТАРАСОВ Лев Васильевич

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕГО МИРА
Книга 3
ЭВОЛЮЦИЯ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНОГО ЗНАНИЯ

Редактор *Ю.Г. Рудой*
Оригинал-макет: *О.А. Пелипенко*
Оформление переплета: *А.Ю. Алевтина*

ЛР № 071930 от 06.07.99. Подписано в печать 04.08.04.
Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 29,17. Уч.-изд. л. 25. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru; <http://www.fml.ru>

Отпечатано с диапозитивов
в ОАО «Чебоксарская типография № 1»
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

ISBN 5-9221-0529-9



9 785922 105293