

Саратовский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского

ФИЗИКА, ТЕХНИКА,
ИНТЕЛЛЕКТ

Саратов
2009

Роках А.Г.

Физика, техника, интеллект. - Саратов, 2009. – 228 с.

Аннотация. Рассмотрена методология познания в современной науке, главным образом в физике, и технике. Проведено традиционное деление физики на науку о макро-, микро- и мегамире, релятивистскую физику. Обсуждаются пути для объяснения явлений жизни и сознания с позиций современной физики и техники. Дается краткая история техники, реализующей успехи естественных наук, и технического образования. Особое внимание уделено искусственному интеллекту – информационной основе современной техники, в частности идеям его реализации на основе квантового компьютера. В приложении приводятся материалы по астрофизике и космологии и краткие биографии ученых.

Для студентов 4-го курса специальности «Материаловедение и технология новых материалов», «Технология нанозлектроники» и других специальностей факультета нано - и биомедицинских технологий.

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

ФИЗИКА, ТЕХНИКА, ИНТЕЛЛЕКТ

Учебное пособие

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. НАУЧНОЕ ПОЗНАНИЕ	7
1. ИСТОРИЯ, СУБЪЕКТ И ОБЪЕКТ ПОЗНАНИЯ	7
1.1. Развитие во времени и особенности научного познания.....	7
1.2. О субъекте познания.....	12
2. ФИЗИЧЕСКОЕ ПОЗНАНИЕ	18
2.1. Знание и вера в физике.....	18
2.2. Геометрия пространства или закон обратных квадратов.....	23
«на пальцах».....	23
2.2.1. Выдержки из «Начал» Евклида и комментарии.....	26
2.3. Роль математики.....	28
РАЗДЕЛ 2. ФИЗИКА МАКРОМИРА	30
3. МЕХАНИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА	30
3.1. Уравнения Гамильтона.....	32
3.2. Основные положения механической картины мира.....	34
3.3. Система Земля - Луна.....	35
3.4. Детерминизм и отклонения от него.....	37
4. ТЕРМОДИНАМИКА	39
4.1. Энергия.....	40
4.1.1. Первое начало термодинамики.....	42
4.1.2. Второе начало термодинамики.....	42
4.1.3. Тепловой насос.....	43
4.1.4. Третье начало термодинамики.....	44
4.2. Термодинамические функции и энтропия.....	44
4.2.1. Внутренняя энергия.....	44
4.2.2. Энтропия.....	45
4.3. Термодинамика неравновесных процессов.....	45
4.3.1. Феноменологические уравнения.....	46
4.4. Синергетика.....	47
4.5. Энтропия и информация.....	48
5. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И ОПТИКА	50
5.1. Уравнения Максвелла.....	51
РАЗДЕЛ 3. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ФИЗИКА	55
6. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	55
6.1. А. Эйнштейн и международный год физики.....	58
6.2. Частная теория относительности.....	60
6.3. Общая теория относительности.....	71
РАЗДЕЛ 4. ФИЗИКА МИКРОМИРА	80
7. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА	80
7.1. История квантовых представлений.....	80
7.2. Уравнение Шредингера.....	83
7.3. О физическом смысле квантовой механики.....	85
7.4. Квантовая механика атома.....	87
7.5. Принцип запрета Паули. Периодическая система элементов. Твердое тело.....	90
7.6. Почему синий свет преломляется сильнее, чем красный? Пример применения квантовой механики и теории электромагнетизма.....	92
8. АТОМНОЕ ЯДРО	96
8.1. История открытий.....	96

8.2. Модели ядра.....	103
8.3. Ядерные силы.....	108
8.4. Техническое применение ядерных реакций.....	109
9. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ.....	111
9.1. История и краткий обзор.....	112
9.2. Виды материи в микромире.....	114
9.3. Поле и вещество.....	119
9.4. Калибровочные теории.....	121
РАЗДЕЛ 5. ФИЗИКА МЕГАМИРА.....	123
10. АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА.....	123
10.1. Происхождение Солнечной системы.....	123
10.1.1. Формирование и судьба Солнца.....	123
10.1.2. Формирование Солнечной системы.....	124
10.2. Астрономия.....	126
10.3. Космология.....	127
10.3.1. Космологические данные.....	128
10.3.2. Космологические модели.....	129
10.4. Нерешенные проблемы космологии.....	135
10.5. Темная энергия.....	136
РАЗДЕЛ 6. ФИЗИКА И СОЗНАНИЕ.....	137
11. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОЗНАНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ	137
ФИЗИКЕ.....	137
11.1. Кошка Шредингера или как может существовать стабильный мир на нестабильном основании.....	137
11.2. Законы сохранения в физике.....	141
11.3. Аксиоматическое построение физических теорий.....	142
12. ХВАТИТ ЛИ АРСЕНАЛА ФИЗИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЖИЗНИ И СОЗНАНИЯ?.....	143
12.1. В рамках традиционной науки.....	143
12.2. Вненаучные подходы.....	144
РАЗДЕЛ 7. КОНЦЕПЦИИ ТЕХНИКИ.....	148
13. ИСТОРИЯ, ЗАКОНОМЕРНОСТИ И СОЦИАЛЬНАЯ РОЛЬ	148
ТЕХНИКИ.....	148
13.1. Краткая история техники: основные этапы и идеи.....	149
13.2. Осмысление феномена техники.....	160
13.2. Автоматизация.....	162
14. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ – ИНФОРМАЦИОННАЯ	165
ОСНОВА ТЕХНИКИ.....	165
14.1. Некоторые определения.....	165
14.2. Искусственный интеллект.....	166
15. КВАНТОВАЯ ПСИХОЛОГИЯ И КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР.....	167
15.1. Квантовая механика и сознание.....	168
15.1.1. Квантовые парадоксы с позиции психолога.....	168
15.1.2. Квантовые парадоксы с позиции физика.....	176
15.2. Квантовый компьютер.....	186
15.2.1. Классические и квантовые приборы.....	186
15.2.2. Сложность алгоритмов.....	188
15.2.3. Кубиты.....	189
15.2.4. Квантовая когерентность векторов состояния.....	191
15.2.5. Идеальный квантовый компьютер.....	191
15.2.6. Классическая и квантовая информация в квантовой системе.....	192
15.2.7. Смешанные и запутанные состояния квантовых систем.....	192
15.2.8. Декогерентизация состояний квантовых систем.....	194
15.2.9. Поиски путей реализации квантовых компьютеров.....	196
16. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ И НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ.....	198
16.1. Зачем нужны искусственные нейронные сети?.....	198
16.2. Свойства нейронных сетей.....	199
16.3. История нейрокомпьютеров.....	200
16.4. Нейронные сети в последние годы.....	202
16.5. Нейронные сети и экспертные системы.....	203
Выводы к главе 16.....	205

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	205
ПРИЛОЖЕНИЯ	207
П.1. ТЕКСТЫ ПО АСТРОФИЗИКЕ И КОСМОЛОГИИ	207
П.1.1. <i>Нейтронная звезда</i>	207
П.1.2. <i>Новая звезда</i>	208
П.1.3. <i>Пульсар</i>	210
П.1.4. <i>Сверхновая звезда</i>	213
П.1.5. <i>Черная дыра</i>	214
П.1.6. <i>Гравитационный коллапс</i>	217
П.2. РАЗБЕГАНИЕ ГАЛАКТИК И ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ	218
П.3. ПАРАДОКС ЭЙНШТЕЙНА-ПОДОЛЬСКОГО-РОЗЕНА	220
П.4. НЕРАВЕНСТВА БЕЛЛА	222
П.5. ПЕРСОНАЛИИ	223
ЛИТЕРАТУРА	229
ВОПРОСЫ ПО КУРСУ	229
ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ	231

Введение

1

Первое утро творения
 Не оставляло сомнения:
 Будущее прочитается
 Методом вычисления.

Омар Хайям

Вероятно, достоинства университетского образования и науки опираются на гуманитарную культуру естественников и естественнонаучную осведомленность гуманитариев. Обычно учебные курсы, посвященные концепциям естествознания, делают упор на последнее. В этой книге сделана попытка «убить двух зайцев»: связать представления, характерные для современной физики и техники, которые занимаются внешним миром человека, с процессом научного познания, протекающего в его внутреннем мире, являющемся в основном предметом забот гуманитариев. Такой подход может быть полезен как студентам, так и будущим аспирантам, которым предстоит сдавать экзамен по философии науки.

При изложении фактического материала автор опирался не столько на оригинальные труды, сколько на энциклопедические издания и обзоры, посвященные затронутым проблемам, в предположении, что курс общей физики проработан достаточно подробно. При этом концепции Эйнштейна, Шрёдингера, Пенроуза, Дойча и некоторых других исследователей по вопросам квантовой механики, квантовых вычислений, роли сознания не оставлены без внимания.

В книге рассматриваются не только одобренные научным сообществом, но и альтернативные (религиозные и «псевдонаучные») подходы, что пока еще не стало традицией нашего образования. Книга задумана как учебное пособие

¹ Авторский перевод рубаи персидского поэта и математика средневековья Омара Хайяма, сделанный с английского и показывающий предчувствие лапласова детерминизма, характерного для классической науки.

по курсу «История и методология науки и техники» на факультете нано - и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета. В этой связи рассматриваются принципы и возможные направления реализации квантового и нейрокомпьютера.

Автор подготовил первый вариант учебного пособия, необходимость которого диктуется нуждами учебного процесса. Все замечания по поводу неизбежных погрешностей и предложения будут внимательно рассмотрены.

Целью изучения дисциплины «История и методология науки и техники», является формирование у студентов:

- комплекса профессиональных знаний и умений разбираться в основных направлениях физики на качественном (не связанном или, точнее, почти не связанном с расчетами) уровне и углубление знаний о физических принципах функционирования технических устройств;

- научной картины физического мира;

- представлений о феномене техники и системе человек-машина с использованием понятий естественного и искусственного интеллекта.

Задачами изучения дисциплины являются:

- формирование и углубление знаний о физической природе макро-, микро- и мегамира;
- формирование знаний и умений связывать физические явления с геометрией пространства, в котором они происходят;
- приобретение навыков разграничения существующих представлений на научные и ненаучные;

Дисциплина «История и методология науки и техники» изучается студентами дневного отделения факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ, обучающимися по специальностям:

200100 Микроэлектроника и твердотельная электроника

202100 Нанотехнология в электронике

071000 Материаловедение и технология новых материалов

014000 Медицинская физика

553400 Биомедицинская инженерия

014100 Микроэлектроника и полупроводниковые приборы и направлению

550700 Электроника и микроэлектроника (*двухуровневая система образования*) в течение 6 учебного семестра.

Материал дисциплины опирается на ранее приобретенные студентами знания по физике, математике, термодинамике и статистической физике, электродинамике, квантовой механике, ядерной физике, истории физики, физике твердого тела, теоретическим основам электротехники, физике полупроводников, и завершает общефизическую подготовку студентов.

При написании учебного пособия автор столкнулся с немалыми мировоззренческими и методологическими трудностями. И хотя фактический материал дан в основном в традиционном изложении, не обошлось и без необходимости

определить авторское отношение к ряду ключевых моментов, которые пришлось изложить не вполне традиционным образом. Для удобства читателей выделим применённые новации.

Методологическая новизна.

1) Закон обратных квадратов «на пальцах» как следствие евклидовости физического пространства.

2) Квадратура круга и число «пи», по Платону.

3) Наглядное качественное описание системы «Земля – Луна», или почему мы видим только одну сторону Луны.

4) Тепловой насос: топливный коэффициент взамен коэффициента полезного действия, «превышающего» единицу.

5) Теория относительности как теория абсолютности на примере парадокса близнецов.

6) Почему синий свет преломляется сильнее, чем красный?

Мировоззренческая новизна.

7) Знание и вера в науке, по О.Д. Хвольсону. Сопоставление с верой в религии.

8) О возможности объяснения феномена сознания в рамках физики.

9) Отношение к вненаучной модели сознания с позиции торсионных полей.

10) Отношение к кришнаитской трактовке сознания Ричардом Томпсоном в его книге «Механистическая и немеханистическая наука».

11) Что есть бог для ученого?

12) Рассмотрение взаимодействия психологии, физики и техники в проблеме «квантовый компьютер».

РАЗДЕЛ 1. НАУЧНОЕ ПОЗНАНИЕ

1. История, субъект и объект познания

1.1. Развитие во времени и особенности научного познания².

На пути от варварства и дикости человечество выработало 2 вида цивилизаций: традиционные и техногенные. Последние возникли позднее. В Европе это был XV-XVII вв., когда техногенные общества начали совершать экспансию на остальной мир, который стал следовать их примеру. Традиционные общества характерны замедленным темпом социального развития. К ним относились Древняя Индия, Китай, Египет, средневековые государства мусульман Востока.

Преддверием техногенной цивилизации можно считать античную культуру. Полисная культура *Древней Греции* подарила потомкам два важнейших

² Степин В.С. Теоретическое знание. М.: «Пресс-Традиция», 2000.-744с.

достижения (изобретения) – *демократию и теоретическую науку*, первым образцом которой была евклидова геометрия. Эти два открытия в сфере регуляции общественных отношений и в способе познания мира стали предпосылками для будущего принципиально нового цивилизационного прогресса.

Второй, и очень важной, вехой стало европейское средневековье. С особым пониманием человека, созданного по образу и подобию Бога, с культом любви к человеку-Богу, Христу, с культом человеческого разума, способного понять и постигнуть тайну божественного творенья. *Целью познания в последующие эпохи как раз и считалась расшифровка промысла Божьего*, плана божественного творения, реализованного в мире – страшно еретическая мысль с точки зрения традиционных религий. Изменение природной среды привело к быстрой трансформации социальных связей людей.

Техногенная цивилизация существует чуть больше 300 лет, но она оказалась подвижной, динамичной и очень агрессивной. Европейская цивилизация поглотила многие традиционные общества и культуры.

Техногенной цивилизации «противостоит» принцип невмешательства, развитый в прошлом в Китае, у-вэй. С. Поуэл в работе «Роль теоретической науки в европейской цивилизации» приводит свидетельства европейских миссионеров о реакции китайских мудрецов на описание европейской науки. «Мудрецы нашли саму идею науки абсурдной, поскольку, хотя Повелителю Поднебесной и дано устанавливать законы и требовать их исполнения под угрозой наказания, исполнять законы и подчиняться им дано лишь тем, кто способен эти законы «понять», а «дерево, вода и камни», о которых толкуют мистификаторы-европейцы, очевидно, этим свойством «понятливости» не обладают: им нельзя требовать их исполнения».

Исследование мышления традиционалистских групп в Средней Азии, проведенное в начале 1930-х гг. А.Р. Лурия, обнаружило, что представители этих групп не могут решать задачи, требующие формального рассуждения по схеме силлогизма. Но те же люди традиционалистских обществ, которые получают школьное образование, включающее обучение математике и другим наукам, решали эти задачи достаточно легко.



Техногенная культура опирается не только на духовность, но и на телесность человека. Предположим, что известному персонажу из антиутопии Оруэлла «1984» удалось бы реализовать мрачный план генетического изменения чувства половой любви. Для людей, у которых исчезла бы эта сфера эмоций, уже не имеют смысла ни Байрон, ни Шекспир, ни Пушкин – для них выпадают целые пласты человеческой культуры. Вне телесности невозможна духовность.

Существуют многочисленные антисциентические концепции, возлагающие на науку и её технологические последствия ответственность за нарастаю-

щие глобальные проблемы. Крайний антисциентизм по существу призывает вернуться к традиционным обществам. Но на этом пути невозможно обеспечить жизненными благами постоянно растущее население.

Выход состоит не в отказе от научно-технического развития, а в придании ему гуманистической направленности, что, в свою очередь, ставит проблему нового типа научной рациональности, включающей в явном виде гуманистические ориентиры и ценности.

Такое требование порождает ряд вопросов. Как скажется включение внешних для науки ориентиров на развитие самой науки, не приведет ли это к деформации научной истины, естественнонаучного знания? Для решения таких вопросов необходим анализ специфики научного знания.

Отличительные признаки научного³ познания.

Структурные характеристики элементарного акта деятельности можно представить в виде следующей схемы:



Ценность отвечает на вопрос, для чего нужна та или иная деятельность? Цель — на вопрос: что должно получиться в результате деятельности? Цель — идеальный образ продукта.

Известно, что в мифах древних народов силы природы всегда уподобляются человеческим силам. Первый этап — замена (в представлении) человеческих сил механическими.

Наука ориентирована на предметное и объективное исследование действительности. Хотя личные пристрастия ученого и оказывают влияние. Но наука не может заменить собою всех форм человеческого познания (ср.: Хвольсон, см. ниже).

В самой науке морально-этические нормы играют огромную роль. Ученый может ошибаться, но не может подтасовывать факты. Обязательны ссылки на предшественников.

³ НАУКА, сфера человеческой деятельности, функция которой — выработка и теоретическая систематизация объективных знаний о действительности; одна из форм общественного сознания; включает как деятельность по получению нового знания, так и ее результат — сумму знаний, лежащих в основе научной картины мира.

Система наук условно делится на естественные, общественные, гуманитарные и технические науки.

Наука отличается от обыденного знания, так как постоянно выходит за рамки предметных структур наличных способов и видов освоения мира. **Основные установки науки: самоценность истины и ценность новизны.**

В середине 70-х гг. XX века громкую скандальную известность приобрело так называемое дело Галлилея (биохимика и нейрофизиолога). Им было выдвинуто предположение, что растительные морфины и внутримозговые морфины одинаково воздействуют на нервную ткань. Он провел серию трудоемких исследований, но не смог убедительно подтвердить эту гипотезу и тогда решился на фальсификацию. Но был разоблачен на специальном симпозиуме в Мюнхене в 1977 г. Он вынужден был принести извинения и заявил, что прекращает свои занятия наукой.

СПЕЦИФИКА НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. Знание - главный продукт научной деятельности, но не единственный. К продуктам науки можно отнести и научный стиль рациональности, который распространяется во все сферы деятельности людей; и различные приборы, установки, методики, применяемые за пределами науки, прежде всего в производстве. Научная деятельность является и источником нравственных ценностей⁴.

Хотя наука ориентирована на получение истинных знаний о реальности, наука и истина не тождественны. Истинное знание может быть и ненаучным. Оно может быть получено в самых разных сферах деятельности людей: в обыденной жизни, экономике, политике, искусстве, в инженерном деле. В отличие от науки, получение знания о реальности не является главной, определяющей целью этих сфер деятельности (в искусстве, например, такой главной целью являются новые художественные ценности, в инженерном деле - технологии, изобретения, в экономике - эффективность и т.д.). Важно подчеркнуть, что определение "ненаучный" не предполагает негативную оценку.

История науки показывает, что научное знание не всегда является истинным. Понятие "научный" часто применяется в ситуациях, которые не гарантируют получение истинных знаний, особенно когда речь идет о теориях. Многие научные теории были опровергнуты. Иногда утверждают (например, Карл Поппер), что любое теоретическое высказывание всегда имеет шанс быть опровергнутым в будущем.

Наука не признает паранаучные концепции - астрологию, парапсихологию, уфологию и т.п. Она не признает эти концепции не потому, что не хочет, а потому, что не может, поскольку, по выражению Т. Гексли, "принимая что-нибудь на веру, наука совершает самоубийство".

До недавнего времени наука была свободной деятельностью отдельных ученых. Она не была профессией и никак специально не финансировалась. Как правило, ученые обеспечивали свою жизнь за счет оплаты их преподавательской работы в университетах. Однако сегодня ученый - это особая профессия. В XX веке появилось понятие "научный работник". Сейчас в мире около 5 млн. людей профессионально занимаются наукой. Для развития науки характерны противостояние различных направлений. Новые идеи и теории утверждаются в напряженной борьбе.

КРИТЕРИИ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ. Каковы же критерии научного знания, его характерные признаки? Одним из важных отличительных качеств научного знания

⁴ Аруцев А.А., Ермолаев Б.В., Кутателадзе И.О., Слуцкий М.С. "Концепции современного естествознания". Учебное пособие. – М.: 1999.

является его систематизированность. Она является одним из критериев научности. Но знание может быть систематизированным не только в науке. Кулинарная книга, телефонный справочник, дорожный атлас и т.д. и т.п. - везде знание классифицируется и систематизируется. Научная же систематизация специфична. Для нее свойственно стремление к полноте, непротиворечивости, четким основаниям систематизации. Научное знание как система имеет определенную структуру, элементами которой являются факты, законы, теории, картины мира. Отдельные научные дисциплины взаимосвязаны и взаимозависимы. **Стремление к обоснованности, доказательности знания является важным критерием научности.** Обоснование знания, приведение его в единую систему всегда было характерным для науки. Со стремлением к доказательности знания иногда связывают само возникновение науки. Применяются разные способы обоснования научного знания. **Для обоснования эмпирического знания применяются многократные проверки, обращение к статистическим данным и т.п. При обосновании теоретических концепций проверяется их непротиворечивость, соответствие эмпирическим данным, возможность описывать и предсказывать явления.** В науке ценятся оригинальные, "сумасшедшие" идеи. Но ориентация на новации сочетается в ней со **стремлением элиминировать из результатов научной деятельности все субъективное, связанное со спецификой самого ученого.** В этом - одно из отличий науки от искусства. Если бы художник не создал своего творения, то его бы просто не было. Но если бы ученый, пусть даже великий, не создал теорию, то она все равно была бы создана, потому что представляет собой необходимый этап развития науки, является intersubъективной.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ. Хотя научная деятельность специфична, в ней применяются приемы рассуждений, используемые людьми в других сферах деятельности, в обыденной жизни. Для любого вида человеческой деятельности характерны **приемы рассуждений, которые применяются и в науке, а именно: индукция и дедукция, анализ и синтез, абстрагирование и обобщение, идеализация, аналогия, описание, объяснение, предсказание, гипотеза, подтверждение, опровержение** и пр.

Основными методами получения эмпирического знания в науке являются **наблюдение и эксперимент.** Наблюдение - это такой метод получения эмпирического знания, при котором главное - не вносить при исследовании самим процессом наблюдения какие-либо изменения в изучаемую реальность. В отличие от наблюдения, в рамках эксперимента изучаемое явление ставится в особые условия. Как писал Ф.Бэкон, "природа вещей лучше обнаруживает себя в состоянии искусственной стесненности, чем в естественной свободе". Важно подчеркнуть, что эмпирическое исследование не может начаться без определенной теоретической установки. Хотя говорят, что факты - воздух ученого, тем не менее, постижение реальности невозможно без теоретических построений. И.П.Павлов писал по этому поводу так: "...во всякий момент требуется известное общее представление о предмете, для того чтобы было на что цеплять факты..." Задачи науки никак не сводятся к сбору фактического материала. Сведение задач науки к сбору фактов означает, как выразился **А.Пуанкаре**, "полное непонимание истинного характера науки". Он же писал: "**Ученый должен организовать факты.** Наука слагается из фактов, как дом из кирпичей. И одно голое накопление фактов не составляет еще науки, точно так же как куча камней не составляет дома".

Научные теории не появляются как прямое обобщение эмпирических фактов. Как писал А.Эйнштейн, "**никакой логический путь не ведет от наблюдений к основным принципам теории**". Теории возникают в сложном взаимодействии теоретического мышления и эмпирии, в ходе разрешения чисто теоретических проблем, в процессе взаимодействия науки и культуры в целом.

В ходе построения теории ученые применяют различные способы теоретического мышления. Так, еще Галилей стал широко применять мысленные эксперименты в ходе построения теории. В ходе мысленного эксперимента теоретик как бы проигрывает возможные варианты поведения разработанных им идеализированных объектов. **Математический эксперимент - это современная разновидность мысленного эксперимента**, при котором возможные последствия варьирования условий в математической модели просчитываются на компьютере.

При характеристике научной деятельности важно отметить, что в ее ходе **ученые порой обращаются к философии**. Большое значение для ученых, особенно для теоретиков, имеет философское осмысление сложившихся познавательных традиций, рассмотрение изучаемой реальности в контексте картины мира. **Обращение к философии особенно актуально в переломные этапы развития науки**. Великие научные достижения всегда были связаны с выдвижением философских обобщений. (Всегда ли? – А.Р.). Философия содействует эффективному описанию, объяснению, а также пониманию реальности изучаемой наукой.

Итак, **главные черты научного знания**: а) установка на исследование законов преобразования объектов и реализующая эту установку **предметность** и **объективность** научного знания. б) выход науки за рамки предметных структур производства и возможностей сегодняшнего их производственного освоения (**опережающее развитие**).

1.2. О субъекте познания

Хотя традиция изложения физики, как и любой естественной науки, опирается на объект, настала пора нарушить эту монополию объекта. Действительно, как показывает вышеприведенная схема, субъект является равноправным участником триады, на которой строится исследовательская работа в науке (рис. 1), если не сказать больше. Другое дело, что субъект, опять-таки традиционно, изучается вне рамок физики. Поэтому в пределах этой учебной дисциплины можно дать лишь краткие представления о субъекте познания.

Основное богатство, которым владеет человек, как венец развития живых существ, это развитая, обладающая сознанием **психика**. В науке это понятие пришло на смену душе, и вследствие сложности имеет немало определений, выделяющих отдельные стороны этого понятия. Определения создают и различные модели психики. Напомним вкратце, что имеется в виду под моделями и моделированием.

Модели можно разделить на три основных вида: **логико-интуитивные**, **натурные (физические)** и **аналоговые**. С натурными моделями мы сталкиваемся достаточно часто: это, например, выкройка, представляющая собой модель будущей одежды. Это и чертеж как модель детали. Словесное описание природы - тоже пример моделирования, правда, такую модель следует отнести уже к мысленно-интуитивной. К последней категории принадлежат также математические модели.

Аналоговая модель действительно представляет собой некий аналог, который либо фактически может заместить собой объект, поскольку проявляет поведение, подобное поведению объекта, либо отражает его существенные чер-

ты, хотя и не выглядит как таковой. Аналоговой моделью может являться график, таблица, расписание занятий, эквивалентная схема в электро- или радиотехнике, отображающие собой поведение реальных объектов, процессы происходящие "на самом деле", т.е. такие которые мы можем воспринимать с помощью органов чувств или приборов.

Модель выполняет не только познавательную роль, но и выступает в качестве средства объяснения, предсказания и эвристики. Несмотря на условный характер разделения моделей на указанные три вида, важно подчеркнуть основную мысль: процесс познания всегда сопровождается моделированием. Последнее связано с характером нашей психики, как будет показано ниже.

Что же ограничивает произвол в выборе модели? Это, пожалуй, стремление к объективности, без которой полезность знания весьма ограничена. Но как достигается объективность, если познание субъективно, поскольку ведется субъектом? Субъектом в философии и психологии, как известно, называют некое активное начало (и его носителя) в познавательном процессе, противопоставляемое объекту, т.е. предмету или явлению, на которые направлена активность субъекта. Что касается объективности, то под ней понимают независимость от субъекта.

Как же проверяется *независимость от субъекта*? Критерием может служить эксперимент, практика. В конечном итоге - это общественная практика. А суждение об успешности выбора модели выносит сообщество специалистов. *Успешно функционирующую логико-интуитивную модель процесса или явления философы нередко склонны называть истиной.* Из только что сказанного видно, что истина, отражая коренные свойства объекта, является в известной мере продуктом соглашения специалистов, т.е. она конвенциональна.

Такой истиной является, например, закон всемирного тяготения, открытый И. Ньютоном и включающий положение о том, что сила притяжения двух точечных тел обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Это мысленная, точнее математическая, модель тяготения, с которой согласились в конечном итоге специалисты того времени, но которая, как показало дальнейшее развитие физики, отнюдь не носит абсолютного характера, т.к. справедлива только для евклидова пространства. А одной из главных характеристик евклидова пространства является прямолинейность распространения света. Конвенциональность же заключена в формулировке законов Ньютона, лежащих в основании всей классической механики. В самом деле, в формулировке присутствует упоминание об инерциальной системе отсчета, которого не было у самого Ньютона. Его добавили впоследствии по соглашению между специалистами.

Физика как рациональная конструкция настолько уверовала в могущество математики, что перестает замечать, что мировоззренческие проблемы, поставленные некоторыми из корифеев (связь между объектом и субъектом, трансперсональная психология), не преодолены на метафизическом уровне до сих пор. Некоторые из них успешно решаются математически, т. е. конструктивно. Это не означает, однако, что в подобных проблемах достигнуто глубокое понимание. Однако физика по большинству проблем занимает более четкую позицию, чем психология. Это связано отнюдь не столько с «большим интеллекту-

альным могуществом» физиков, сколько с большей простотой (как это видится, по крайней мере, сейчас) ее предмета (остающегося, тем не менее, весьма сложным и противоречивым). *Если в физике или любой другой естественной науке объект «устроен» проще субъекта, то в психологии познающий субъект в наиболее сложных вопросах сталкивается с необходимостью исследовать себя*, а себя он (слава богу!) исчерпать не может.

Отечественный специалист по математическому моделированию естественного и искусственного интеллекта **В.А. Лефевр**⁵ считает, что «естественно-научная традиция, окончательно сложившаяся в 1-й половине 20 в., содержит в своей основе два скрытых постулата:

Теория об объекте, имеющаяся у исследователя, не является продуктом деятельности самого объекта.

Объект не зависит от факта существования теории, отражающей этот объект».

В психологии существует **закон Вебера-Фехнера**, гласящий, что реакция органов чувств на возбуждение (стимул) имеет логарифмический характер. Этот закон, как и предыдущий, является объективным, хотя он и применяется к субъекту. Откуда же здесь возникает объективность? Она происходит из того обстоятельства, что для всех субъектов характер полученной зависимости (закона) одинаков, т.е. не зависит от конкретного субъекта. Что касается конвенциональности этого закона, то она проявляется в выборе логарифмической зависимости, а не степенной, которая тоже известна для тех же целей. Этот степенной закон получил название закона Стивенса по имени американца С.С. Стивенса, опиравшегося на психофизиологические исследования, которые обнаруживают весьма сильную индивидуальную изменчивость.

Рассмотрим закон Вебера-Фехнера более подробно, поскольку это практически единственный количественный закон, который используется в психологии, выраженный в виде функциональной зависимости. О статистических методах обработки наблюдений я не говорю, поскольку они не специфичны для психологии и обслуживают широкий спектр наук и наблюдений.

Итак, закон Вебера-Фехнера – это логарифмическая зависимость силы ощущения E (внутренний мир) от физической интенсивности раздражителя P (внешний мир):

$$E = k \log P + c, \quad (1.1)$$

где k и c - константы, определяемые конкретной сенсорной системой.

Что касается степенного закона Стивенса, то он связывает те же переменные E и P степенной зависимостью вида

$$E = \beta P^\alpha. \quad (1.2)$$

Здесь β - характеристика конкретной сенсорной системы, а $0 < \alpha < 1$.

На практике используются обе зависимости. Соотношение (1) применяется в медицинской диагностике при количественной оценке потери слуха и выражается в децибелах (дб): $1 \text{ дб} = 20 * \log_{10} E_1 / E_2$, где E_1 – нормальная чувствительность, а E_2 – пониженная.

⁵ Лефевр В.А. Рефлексия. – М.: «Когито-Центр», 2003. – 496 с.

Степенной закон (1.2) применяется в устройствах для определения фотографической выдержки – экспонометрах, встроенных в фотоаппараты. Для применяемых в аналоговых фотоаппаратах экспонометров $\alpha = 0,56$.

Поскольку в приведенных примерах речь идет об органах чувств (рецепторах) различной модальности⁶, то в первом случае раздражителем является звуковой сигнал, и сила ощущения характеризуется чувствительностью к этому сигналу, т.е. к звуку, а во втором - об интенсивности света и соответствующей световой чувствительности.

Закон Вебера-Фехнера показывает, что функциональные соотношения, которые в конкретных случаях могут превратиться в числовые, можно записать на «границе» внешнего и внутреннего миров. В «глубине» внутреннего мира такие соотношения не получены.

Например, нет количественной связи между интенсивностью «душевной» боли и силой вызвавшего ее стимула (например, изменой близкого человека). Что касается боли, то не существует пока количественной связи и между телесной болью и силой вызвавшего ее воздействия, т.е. для боли закон, аналогичный закону Вебера-Фехнера, не найден.

Количественные соотношения для «чисто» психических явлений получить пока не удастся. Связано это в значительной мере с тем, что понятие «психика» далеко не простое. Здесь надо различать философское и конкретно-научное содержание этого понятия, хотя даже в конкретно-научном определении (дефиниции) понятия «психика» вряд ли можно полностью обойтись без философского его осмысления ввиду предельно общего характера этого понятия. Вероятно, нелишне будет напомнить, что основной вопрос философии, как он понимается в диалектическом и историческом материализме, - это вопрос об отношении сознания к бытию, мышления к материи. Разделение мира на эти две сущности в западной традиции началось, как уже отмечалось, с Декарта (дуализм).

Правда, даже в диалектическом материализме признавалась правомерность разделения мира на материю и сознание (или шире: психику) только в рамках основного вопроса философии. Вне этих рамок их противопоставление снимается. Другая причина снятия такого противопоставления - уход из общественного сознания директивного диалектического материализма вместе с его формулировкой основного вопроса философии.

⁶ МОДАЛЬНОСТЬ, категория, выражающая отношение говорящего к содержанию высказывания, отношение последнего к действительности. Модальность может иметь значение утверждения, приказания, пожелания и др. Выражается специальными формами наклонений, интонацией, модальными словами (напр., «возможно», «необходимо», «должен»); в логике такие слова называются модальными операторами, с их помощью указывается способ понимания суждений (высказываний)

Здесь: МОДАЛЬНОСТЬ (от лат. *modus* – способ) – одно из основных свойств ощущений, их качественная характеристика (цвет в зрении, тон и тембр в слухе, характер запаха в обонянии и т.п.). Модальные характеристики ощущений отражают свойства объективной реальности в специфически закодированной форме (длина или частота световой волны отражается как цвет, частота звуковых волн как тон и т.д.).

Кстати о формулировках. Многие понятия, с которыми приходится встречаться при изучении различных наук, перекочевали в наши учебники из философской литературы недавнего прошлого, основанной опять-таки на диалектическом и историческом материализме. Не возражая против того, что исторически упомянутые учения составили определенную веху в развитии философии, автор этой книги обращает внимание читателей на недостаточность таких определений и намерен это в скором времени показать.

Декартов дуализм породил в наше время психофизическую проблему, которая в общем смысле ставит вопрос о месте психического в природе, а в более узком смысле является проблемой соотношения психических и физиологических (нервных) процессов. Для истолкования психофизической проблемы используют так называемый психофизический параллелизм, согласно которому психическое и физическое представляют собой самостоятельные комплексы процессов, коррелирующих между собой, но не связанных причинно-следственными отношениями. Такое толкование причинно-следственных связей, вернее их отсутствия, является одной из черт постнеклассической науки (В.С. Степин), как называют науку нашего времени - эпохи постиндустриального, информационного общества.

Сложность понятия «психика» видна на примере его определения (дефиниции). Достаточно посмотреть, как менялось определение этого понятия на протяжении последних десяти-пятнадцати лет в наших психологических словарях, чтобы получить об этом надлежащее представление.

Известный психолог К. Юнг писал:

*«Наша психика лишь часть природы, и тайна ее безгранична, поэтому мы не можем дать полное определение ни психическому, ни природе. Мы можем лишь заявлять, что **верим** в их существование и описываем, как умеем, - лучшее из того, что мы можем, - каким образом они действуют»⁷.*

Психика по Фрейд и Юнгу делится на следующие «отделы»:

Сознание (эго и суперэго),

Бессознательное (коллективное – супер-ид и индивидуальное – ид).

Коллективное бессознательное «населено» т.н. **архетипами коллективного бессознательного**, которые, как установил К. Юнг с помощью известного физика В. Паули, представляют собой нечто вроде передаваемых по наследству «форм», заполняемых в процессе индивидуальной жизни человека, особенно на ранних ее стадиях, содержанием той культуры, в которой воспитан человек. Архетипы представляют собой в известной степени «мерную линейку», с которой человек сравнивает все встречающиеся на его жизненном пути новые для него явления. «Емкость» коллективного бессознательного соизмерима с опытом всего человечества. Исследуя внешний мир, человек проецирует на него имеющуюся в его распоряжении систему первообразов-архетипов. Получающиеся «объективные» представления носят тем самым печать коллективного опыта человечества, освободиться от которого полностью человек-исследователь не в состоянии.

⁷ Карл Густав Юнг. Архетип и символ. – М.: Renaissance, 1991, с. 27.

Однако основное богатство, которым владеет человек – его психика – требует определения, дать которое достаточно сложно. Однако обойтись совсем без определения – означает создать ненужную размытость понятию, что в любой науке не приветствуется. Будем пользоваться следующим «рабочим» определением: **Психика - это способность к восприятию, моделированию и регулированию (феноменов внутреннего и внешнего мира)**⁸.

В чем нам видятся преимущества этого определения по сравнению с существующими? Во-первых, в том, что оно не привязано к какой-либо философской системе, а содержит (уже определенные нами или широко распространенные) общенаучные термины, с которыми можно практически работать. Во-вторых, это определение содержит те же возможности, которые (по умолчанию) содержит определение взятое из психологического словаря⁹, говорящее о «неотчуждаемой» от субъекта картине мира.

Задумавшись, зачем авторы приведенного определения так его усложнили? По-видимому, затем, чтобы отстроиться от «психики» компьютера, т.е. от систем искусственного интеллекта. Думается, что эта проблема «развязки» (или наоборот связи) с искусственным интеллектом в нашем варианте решается просто: если речь идет об искусственной «психике», точнее об искусственном интеллекте, пишем «искусственная или искусственно созданная способность...»¹⁰.

Психика - такое свойство, которое не дается человеку от рождения в готовом виде, а формируется (на основе определенных задатков) под влиянием воспитания и обучения, воздействия общества и природных сил.

Интересным является вопрос о локализации психики. Чаще всего психические проявления связывают с деятельностью головного мозга человека. Однако исследователи нейрофизиологических особенностей мозга, в том числе лауреаты Нобелевской премии Роджер Уолкотт Сперри(1913-94), Карл Прибрам и Джон Экклз (1903-97) неоднократно указывали на отсутствие прямой связи психических явлений с мозговыми процессами. Все попытки получить внутреннюю картину сознания, вывести образы сознания вовне, скажем на экран телевизора, неизменно кончались неудачей: при подходе со стороны нейрофизиологии сознание «ускользает» от исследователя и появляется «неизвестно как», неожиданно, имерджентно.

Ряд психических явлений (т.н. пси-феномены) указывает в то же время на «дальнодействующий» характер психики (телепатия, например)¹¹. Получается, что локализацию психики указать трудно. Не забудем, что и в образовании восприятий (через ощущения) участвует весь организм, а не только головной мозг.

⁸ Роках А.Г. Предмет психологии с точки зрения физика: о психике без диамата // Известия Саратовского университета, 2001, №1, С. 75-82.

⁹ Психология. Словарь. / Под общей редакцией А.В. Петровского и М.Г. Ярошевского. Сост. Л.А. Карпенко. Изд. второе. - М.: Политиздат, 1990. - 494 с.

¹⁰ А.Г. Роках. От физики к психике. Саратов, 2004, 197 с.

¹¹ См. статью “Parapsychological phenomenon” в компьютерной энциклопедии “Enciclopedia Britannica, 2008”. К парапсихологическим явлениям (пси-феноменам) статья относит: *clairvoyance, telepathy, or precognition* (ясновидение, телепатия, или предсказание). Далее отмечается, что научный интерес к этим издревле известным явлениям появился недавно.

Ведь восприятие представляет собой некий образ воздействия, которое испытывает субъект со стороны окружающей среды или другого человека.

2. Физическое познание

2.1. Знание и вера в физике

Лекцию с таким названием прочел автор популярного многотомного учебника физики Орест Данилович Хв'ольсон, предваряя изучение курса физики в Петроградском университете осенью 1915 года¹². Вспомним, что в это время была в разгаре первая мировая война, Санкт Петербург был переименован в Петроград, а известный профессор говорит о вере. Отсюда можно предположить, какое значение уделял методологии физики О.Д. Хвольсон. Посмотрим, что он пишет.

Нет, конечно, никакой надобности входить в анализ различных философских учений, весьма разнообразных и сугубо друг другу противоречащих. У нас тема узкая и сравнительно простая: Знание и вера в физике. Весьма вероятно, что выводы, к которым мы придем, mutatis mutandis (с соответствующими изменениями – А.Р.), относятся и ко многим другим наукам.

С первого взгляда и при отсутствии вдумчивого отношения к вопросу, может показаться, что знание и вера две совершенно различные области познания, строго разграниченные и ничего общего между собой не имеющие. Но стоит лишь немного подумать, чтобы понять, что знание и вера тесно переплетаются и что нет возможности, сколько-нибудь точно, определить их границы.

Конечно, не трудно привести грубые примеры чистого знания и чистой веры. Вы все знаете, что сегодня суббота, ..., чему равняется $(a+b)^2$; вы знаете, как читается закон Ома, вы знаете, что в стекле синий луч преломляется значительно сильнее, чем красный, что магнитная стрелка отклоняется электрическим током. В этих примерах чистого знания вера не играет никакой роли. Наоборот, вера в Бога, в религиозные догматы – вот случаи чистой веры.

Поверхностное рассуждение легко может привести к наивной мысли, что наука и есть та область, в которой знание столь же нераздельно царствует, как вера в религии. Я постараюсь показать, что это неверно, что даже не так-то легко точно указать, где собственно в нашей науке область чистого знания не переплеталась бы с верой.

*Ясно, прежде всего, что знание и вера суть частные случаи того, что мы называем убеждением или уверенностью, которые являются как бы общим их знаменателем. Чем они отличаются друг от друга? Это довольно просто. **Вера имеет характер чисто субъективный**; она покоится на основаниях, достаточных только в субъективном отношении, т.е. достаточных для того лица, которое верит. И нет возможности сделать веру обязательной для дру-*

¹² О.Д. Хвольсон. Знание и вера в физике. Вступительная лекция, прочитанная в начале осеннего семестра 1915 г. Петроград. Издание Ф.К. Феттерлейна, 1916, 16 с.

гого лица. Поэтому безрассудной и бесцельной является всякая попытка насильно заставить кого либо верить во что либо. Знание также связано с субъективной уверенностью; в то же время оно, понятно, обладает и объективной обязательностью, и поэтому может быть передаваемо от одного лица к другому.

Можно было бы сказать, что знание относится к **достоверному**, а вера к **недостоверному**. Впрочем, я думаю, что это упрощенное определение вряд ли выдержало бы строгий критический анализ.

...Было бы смешно предположить, что я, всю жизнь посвятивший науке, стал умалять роль знания. Вполне ясно и несомненно, что знание – это светоч нашей жизни, это для нас источник высших наслаждений; в нем мы можем надеяться найти удовлетворяющие нас ответы на запросы нашего пытливого ума, желающего **познать окружающий нас мир**, для того, чтобы хоть сколько-нибудь приблизиться к последней заветной цели, к высшей из всех существующих проблем, к **разгадке тайны нашего собственного бытия**. И все-таки я скажу: не следует преувеличивать значения знания и необходимо выяснить роль тесно с ним связанной веры.

Рассуждая о том, из каких источников берется знание, автор Лекции отмечает, что таких источников два. **Первый – это наш личный опыт: мы познаем внешний мир через посредство наших органов чувств**. Правда, иногда они нас обманывают. Поэтому первый источник знания целиком основан на доверии к самому себе. А это уже элемент веры.

Второй источник знания – это устное или письменное сообщение другого лица. Такое знание тоже основано на доверии, на веру в субъективную добро-совестность источника и в объективную правильность сообщаемого. В средней школе трудно отличить знание от веры, доверие к учителю безгранично, даже бессознательно. Доверие студента к профессору уже не безгранично; к нему примешивается критический анализ и, иногда, некоторый, весьма полезный и желательный скептицизм. Тут элемент веры выступает в более сознательной форме.

Вспомним, как шатко все то, что в обыденной жизни мы называем знанием, как быстро меняется содержание этого знания. Знание должно было бы отождествляться с истиной, но тут является великий вопрос: **что такое истина?** Вы тщетно стали бы искать ответа на этот вопрос на страницах Евангельского предания.

Так где же в физике мы имеем знание и какую роль в ней играет вера?

Содержание физики может быть разделено на три части:

- 1) явления качественного характера (данные наблюдений, но без их взаимной связи);
- 2) законы количественные;
- 3) объяснения: а) логические следствия уже известного, б) гипотезы.

На рис.1.1 символически показано, какую роль играют знание и вера в трех главных частях физики, номера которых отложены по оси абсцисс (ОМ). Положим, что ординаты прямой FE соответствуют полному знанию или полной вере без примеси другого элемента (т.е. FE=убежденность – А.Р.). Прямые AD

и CE схематически изображают, какие роли играют знание (AD) и вера (CE) в указанных трех частях физики. В первой части знание (OA) не вполне господствует; к нему примешивается некоторое количество веры (OC). Во второй части вера (LH)

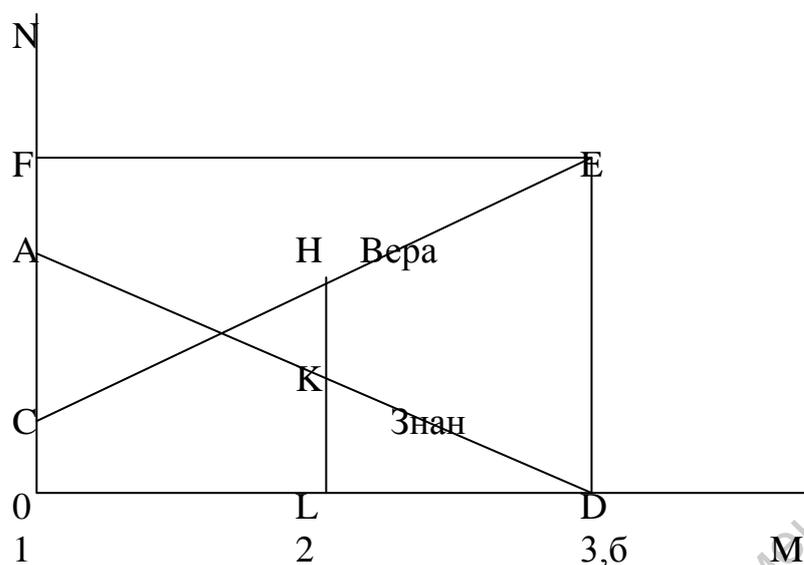


Рис.1.1. Роль знания и веры в 3-х составных частях физического познания, согласно О.Д. Хвольсону

уже значительно преобладает над знанием (LK); наконец, в части (3b) знание падает до нуля, а вера (DE) господствует и только ею держится весь научный материал этой части физики.

Для пояснения начнем с первой части, в которой мы имеем дело с фактами качественного характера: рассматриваются разного рода явления, условия их возникновения, и вообще описываются свойства вещества. Ясно, что в первой части вера (доверие) играет некоторую роль.

Вторая часть физики – это область количественных законов. Здесь, как отображено на рисунке, вера уже значительно преобладает над знанием. Закон на опыте подтверждается всегда лишь приблизительно, в пределах ошибки наблюдений. Закон всемирного тяготения, как известно, выражается формулой

$$f = \frac{mm'}{r^2}.$$

Но, несмотря на все подтверждения этого закона той частью астрономии, которая называется небесной механикой, мы все-таки не можем достичь безусловной уверенности в том, что приведенная формула не должна быть заменена другой, вида

$$f = \frac{mm'}{r^{2+\alpha}},$$

где α - весьма малая величина.

Итак, вы видите, что в законы мы должны и можем почти только верить, и что, следовательно, во второй из вышеуказанных частей физики вера играет уже огромную роль.

Перейдем к третьей части физики, которая занимается объяснением явлений. Здесь объяснение может сводиться к доказательству, что данное явление представляется логическим следствием того, что уже ранее было известно и в науке утвердилось. Объяснение сводится к тому, что *мы новое явление логически связываем с тем научным материалом, который уже раньше был найден*. Достоверность вывода будет полная, если он сделан без логических ошибок, но достоверность объяснения при этом будет та же, что и исходного материала. Следовательно, часть 3а не имеет для нас самостоятельного значения.

Главная сущность физики как науки заключается в части 3б, в построениях, основанных на определенных гипотезах. В этой области мы имеем исключительно только *чистую веру*. Это видно из того, что одну и ту же гипотезу одни ученые принимают, т.е. в нее верят, а другие ученые ее отвергают, в нее не верят.

Исчезновение гипотезы возможно в двух случаях. Во-первых, это происходит, когда открывается явление, которое безусловно противоречит гипотезе. Затем бывают случаи, когда гипотеза постепенно приближается к достоверности, и тогда мы имеем достоверное знание. Сюда относится гипотеза вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. С первым случаем связана гипотеза об эфире. Величайший физик второй половины XIX столетия Вильям Томсон (лорд Кельвин) писал, что мы об эфире знаем больше, чем о материи. С тех пор прошло каких-нибудь двадцать лет, и взгляд на эфир совершенно изменился. В настоящее время (начало XX века – А.Р.) эфиром в науке совсем не пользуются.

Однако истинная сущность физики заключается именно в части 3б. Истинная наука не заключается в перечне явлений или законов, а в построении теории явлений, т.е. в соединении большого количества фактов и законов в одно стройное целое, достойное названия научного здания; фундаментом его служит определенная гипотеза. Из сказанного, по-видимому, ясно, какую роль играет в науке вера и какую сравнительно малую роль играет действительное знание.

Около середины XIX века на почве быстрых и действительно больших успехов естественных наук расцвел материализм, полагающий, что все без исключения наблюдаемые явления возникают только благодаря разнообразным свойствам материи. Сюда же были отнесены все явления жизни, психики, сознания. Тогда-то появилась прелестная идея, что мысли суть такие же выделения мозга, как, например, желчь есть выделение печени. Разум человека (а человечества? – А.Р.) ограничен, имеет свои пределы. Не трудно указать на ряд вопросов, лежащих вне этих пределов. Вот некоторые из них.

Проблема пространства и времени; вопрос об их конечности и бесконечности, одинаково непостижимый, одинаково приводящий к неразрешимым противоречиям.

Проблема жизни; вопрос о разнице между живым и мертвым.

Проблема сознания, наличность которого каждым из нас ясно ощущается.

Проблема свободы воли.

Можно было бы указать и другие. Много тайн человечеством разгадано; спрашивается, не будут ли и эти проблемы разрешены со временем? Это вопрос

веры. Но, несомненно, существуют пределы, за которые разум человека проникнуть не может. Наивной и опасной ошибкой следует, поэтому, признать отрицание трансцендентного, т.е. лежащего вне пределов познаваемого, а, следовательно, и отрицание всего сверхъестественного. Представляется величайшей нелепостью всякая попытка перетянуть сверхъестественное в область естественного, т.е. воспринимаемого нашими органами чувств. Сюда относятся спиритизм, оккультизм и т.п. заблуждения. Но, как самодовлеющая сущность, трансцендентное, не познаваемое опытом, есть предмет веры.

Если вы поняли роль веры в науке, которую наивные люди отождествляют со знанием, то вы преисполнитесь терпимостью ко всему, что составляет предмет веры, и, подвергая спокойному анализу ваши личные переживания, поставите веру на подходящее ей место. Я хотел повлиять на вас, чтобы вы не придавали науке того значения, которое она не имеет. Значение науки так велико, что оно не может быть выражено никакими словами. Это тот светоч, без которого мы окружены безнадежной темнотой. Но остерегайтесь, чтобы этот светоч не сыграл для вас роль того огня, в котором гибнет ночная бабочка. Сохраните в себе этот чудный дар – способность верить, без которого жизнь невозможна.

Таково в сокращенном изложении содержание лекции О.Д. Хвольсона, переданная нам как эстафета через почти столетие. А в наше время для науки это срок немалый. Темпы познания высоки как никогда. Тем более, можно с удовлетворением констатировать, что рассуждения известного российского ученого и педагога, воспитателя нескольких поколений отечественных физиков не устарели и в основном справедливы и в наше время. И это несмотря на то, что физика пережила за эти годы революцию, начало которой уже в те годы захватил О.Д. Хвольсон.

К высказанным им мыслям мы будем неоднократно возвращаться в дальнейшем.

Каждая наука имеет свой объект изучения и пользуется собственными методами для изучения объекта. Наука о природе, физика, конечно, не исключение. **Физика – наука**, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие свойства и законы движения окружающих нас объектов материального мира, такие как поведение тел под действием сил, включая происхождение этих сил. Физика посвящена изучению структуры материи и взаимодействию между фундаментальными составными частями наблюдаемой вселенной. Физика имеет дело с небольшим числом фундаментальных законов.

Закон в классической физике обычно трактуется как установленная зависимость между переменными величинами, измеряющими определённые свойства. Законы природы известны двух видов: 1) утверждение считается универсальным, если в нем говорится, что положение, справедливое при некоторых определенных условиях, может быть справедливо и при некоторых других условиях; 2) закон может быть вероятностным.

Для постижения свойств объекта используются методы, которые можно кратко разделить на экспериментальные и теоретические. Первые связаны с чувственным восприятием объекта и предварительным объяснением особенно-

стей этого восприятия. Вторые – с теоретическим объяснением, которое призвано дать ему большую общность, чем это способен сделать эксперимент, и позволяет объяснить его. Первый вид исследования связан в основном с органами чувств, второй – с участием разума (рис. 1).

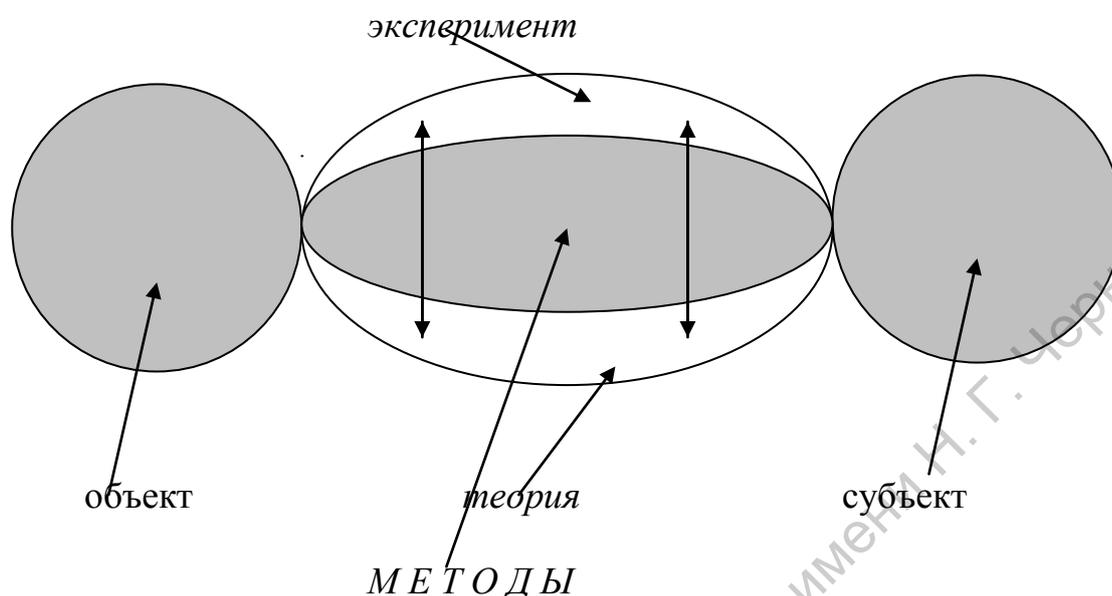


Рис. 1.2. Взаимодействие субъекта с объектом в процессе познания

В ходе эксперимента мы апеллируем к органам чувств, а при теоретическом рассмотрении - к разуму. Сказанное не означает, что разум не принимает участия в первом процессе. Это и обдумывание эксперимента, и предварительная обработка, и систематизация результатов, которая производится теперь обычно с помощью компьютера (т.е. прибора искусственного интеллекта).

Вопрос, центральный для этой книги, *способна ли физика объяснить и явления разума*, – не должен казаться чужеродным или даже кощунственным, поскольку разумом мы по большей части, пользуемся как изначально данной природной способностью. Эта способность, вероятно, может быть усовершенствована путем ее физической интерпретации, как это уже имело место для искусственного интеллекта, реализация которого была бы невозможна без успехов фундаментальной и прикладной физики.

Поэтому нам предстоит сделать обзор концептуальной базы современной физической науки и связанной с ней техники и ответить на вопрос, *дает ли современная физика, возможно, самая развитая из естественных наук, ответ на вопрос о «механизмах» разумной деятельности человека.* Или материальная природа и психические явления представляют собой две самостоятельные для изучения сущности, как и во времена Декарта.

2.2. Геометрия пространства или закон обратных квадратов «на пальцах»

Эти две декартовых сущности отличаются свойством протяженности в пространстве: для материи это свойство является существенным, для сознания

– нет. Под пространством понимается трехмерное декартово пространство, определяемое тремя (пространственными) координатами. Важно, таким образом, что представляет собой пространство, в котором разворачиваются процессы материальной природы, изучаемые физикой. Рассмотрим один сравнительно простой случай, пользуясь для его анализа минимальным набором инструментов, к каковым отнесем органы чувств (зрение) и способность логически рассуждать, пользуясь минимальными знаниями школьного курса физики.

Для этого проведем мысленный или натурный эксперимент. В качестве объекта расположим перед собой кисти рук на разном расстоянии от глаз. Нетрудно согласиться с утверждением о том, что ближайшая к глазам кисть руки кажется нам больше. Так как мы знаем, что кисти у нас одинаковые, в чем мы можем убедиться, совмещая ладони рук, небезынтересно проанализировать причину этого факта. Она лежит в области оптических явлений и касается т.н. геометрической оптики. Из школьного курса физики известно, что при определенных условиях (здесь выполняемых) величина изображения предмета обратно пропорциональна его расстоянию от наблюдателя. В данном случае расстояние отсчитывается от хрусталика глаза, представляющего собой с точки зрения оптики двояковыпуклую линзу.

Ход световых лучей показан на рис. 1.3.

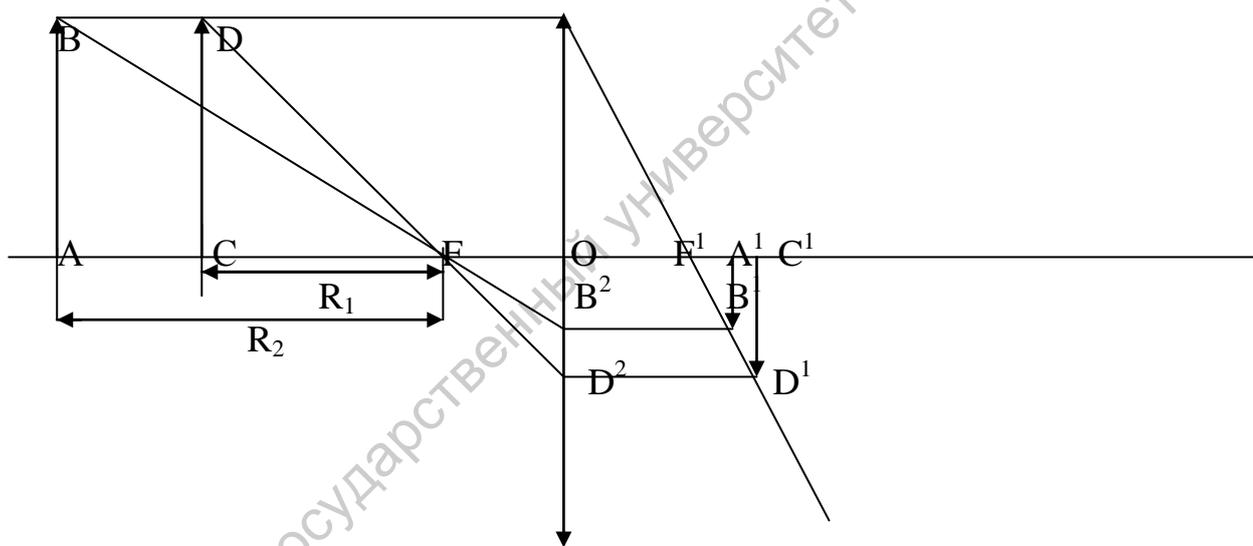


Рис. 1.3. Рисунок, иллюстрирующий обратную пропорциональность размера изображения расстоянию до объекта

Дано: два одинаковой высоты D предмета AB и CD расположены на разном расстоянии R_2 и R_1 от линзы (выпуклой) с оптическим центром O .

Требуется доказать: Размеры их изображений $A^1B^1=OB^2$ и $C^1D^1=OD^2$ обратно пропорциональны расстояниям AF (R_2) и CF (R_1) исходных предметов до линзы (до фокуса линзы F).

Доказательство: запишем тангенс $\angle AFB=R/R_2=A^1B^1/F$ и

Тангенс $\angle AFD=R/R_1=C^1D^1/F$.

Выражая теперь F из обоих равенств и приравнявая полученные выражения, получим $F=A^1B^1 \cdot R_2/R=C^1D^1 \cdot R_1/R$, откуда $A^1B^1/C^1D^1=R_1/R_2$, то есть вели-

чины изображений обратно пропорциональны расстояниям предметов до линзы.

Если мы имеем дело с двухмерным предметом, то его площадь (и сила воздействия на глаз – психологический термин) обратно пропорциональна квадрату расстояния до линзы.

Поскольку правила построения изображения в линзе основаны на Евклидовой геометрии, то получаем, что для этой геометрии закон обратных квадратов является «свойством пространства».

Анализ рис. 1.3 подтверждает известный факт, упомянутый выше, о том, что величина изображения объекта обратно пропорциональна его расстоянию от линзы. Поскольку наш объект двумерный, т.е. мы воспринимаем его площадь, то можем, исходя из тех же рассуждений, сказать, что площадь изображения объекта обратно пропорциональна квадрату расстояния от линзы. В самом деле, площадь равна произведению ширины объекта на его высоту, причем каждый из сомножителей по величине обратно пропорционален расстоянию. Получаем «на пальцах» популярный в физике закон обратных квадратов, гласящий, что сила взаимодействия между телами обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Какие же тела взаимодействуют в нашем случае? Это (освещенная) ладонь и глаз наблюдателя. Поскольку информацию мы получаем от глаза, имеет смысл оценить воздействие объекта на глаз наблюдателя. Как мы только что установили, сила такого воздействия обратно пропорциональна квадрату расстояния. Напрашивается аналогия с фотометрическим законом, по которому освещенность экрана обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника света. Фотометрический закон был известен еще Кеплеру. А Ньютон, живший позднее, наверняка был в курсе этого открытия. Известно, что ранние труды гения механики были посвящены оптике. Закон всемирного тяготения, которым мы успешно пользуемся до сих пор, был сформулирован не без влияния трудов Кеплера, в том числе и его оптических трудов. Открытый значительно позже закон Кулона, описывающий взаимодействие точечных электрических зарядов, тоже дает выражение для силы взаимодействия через квадрат расстояния между взаимодействующими объектами (зарядами). Что же общего между этими физическими законами, установленными в различных областях нашей науки?

Можно надеяться, что одинаковая математическая форма названных соотношений имеет глубокую физическую природу. И эта природа связана со свойствами самого пространства, в котором и разворачиваются описанные взаимодействия. И эти свойства породили соответствующее математическое описание. Как, по-видимому, догадался читатель, речь идет о евклидовом пространстве, о котором его автор, великий греческий математик говорил: все, что видно, видно по прямой. Перечисленные физические законы имеют место в пространстве, в котором свет распространяется прямолинейно. Эти законы и образуют каркас классической физики.

Закон обратных квадратов, если говорить о его математической стороне, может иметь особенности в области малых расстояний, где сила взаимодействия быстро растет. Такие условия реализуются при взаимодействии света с веществом, в котором характеристические расстояния сравнимы с длиной световой волны (или меньше ее). Можно ожидать, что вблизи вещества или внутри него свет имеет другие законы распространения, а, следовательно, там существует другое пространство, в котором реализуются и другие взаимодействия. В дальнейшем мы увидим, что это интуитивное ожидание оправдывается в физике микромира, проявляющейся в атомных и ядерных процессах, и в тесно связанной с ней физике мегамира, к услугам которой вся вселенная.

2.2.1. Выдержки из «Начал» Евклида и комментарии

В книге Евклида "Начала" математика выступала, пишет М. Клайн, "...как идеальная версия того, что составляло содержание известного нам реального мира...". Каждая книга "Начал" начинается с определений. В первой книге "Начал" приведены постулаты и аксиомы, за ними расположены в строгом порядке теоремы и задачи на построение (так, что доказательство или решение чего-либо последующего опирается на предыдущие). Там же введены 23 предварительных определения объектов геометрии: например, "точка есть то, что не имеет частей"; "линия - длина без ширины"; "прямая линия есть та, которая равно расположена по отношению к точкам на ней". Были введены определения угла, плоскости, квадрата, круга, сферы, призмы, пирамиды, пяти правильных многогранников и др.

За определениями следовали 5 известных постулатов (требований) Е. к построению фигур в геометрии: 1) От всякой точки до всякой другой точки возможно провести только одну прямую линию; 2) Ограниченную прямую линию возможно непрерывно продолжать по прямой; 3) Из всякого центра и всяким раствором возможно описать круг; 4) Все прямые углы равны между собой; 5) Если прямая, падающая на две прямые, образует внутренние и по одну сторону углы, меньшие двух прямых, то продолженные эти две прямые неограниченно встречаются с той стороны, где углы меньше двух прямых. Пятый постулат имеет столь важное значение, что он получил специальное наименование "пятый постулат Евклида о параллельных"

Такие утверждения Евклида, как "прямая - кратчайшее расстояние между двумя точками", "через любые три точки, не лежащие на одной прямой, можно провести плоскость, и притом только одну" и постулат о параллельных были названы Кантом "априорными синтетическими суждениями" (см. Априорные синтетические суждения), являющимися частью "оснащения" нашего разума. По Г.С. Ключелю (1763), восприятие аксиом Евклида (и в большей степени аксиомы о параллельных) как чего-то достоверного основано на человеческом опыте, ибо аксиомы опираются не столько на очевидность, сколько на опыт. А для Канта вообще был немыслим иной способ организации опыта, чем геометрия Евклида и механика Ньютона. Таким образом, со времен "Начал" Евклида и

фактически до конца 19 в. *законы окружающего нас физического пространства* макромира *были*, как полагал М. Клайн, "*...всего лишь теоремами геометрии Евклида и ничем больше...*".

А поскольку аксиома о параллельных полностью независима от остальных, то возможно заменить ее противоположной аксиомой и выводить следствия из вновь сконструированной аксиоматической системы. Это привело к созданию неевклидовых геометрий, в которых аксиома о параллельных непротиворечиво заменяется на другую аксиому, адекватную свойствам пространства, над которым строится данная неевклидова геометрия.

Хотя сочинение Евклида предназначалось для изучения физического пространства, структура самого сочинения, его остроумие и ясность изложения стимулировали аксиоматически-дедуктивный подход не только к остальным областям математики, но и ко всем естественным наукам. Через "Начала" Евклида понятие логической структуры всего физического знания, основанного на математике, стало достоянием интеллектуального мира¹³.

Классическая физика имеет дело с евклидовым пространством, пространством предметов, соизмеримых с размерами человеческого тела, в котором наши органы чувств позволяют нам обходиться без усиливающих их приборов. Это пространство трехмерно, иногда двумерно. Символом его может считаться, например, число π . Это число было известно древним грекам. Вот пример геометрической задачи на определение числа π , предлагавшийся в Академии Платона.

Рассмотрим круг с центром O , наложенный на многоугольник $ABEFCD$. Треугольник $ВЕО$ прямоугольный равнобедренный, а треугольник FOC прямоугольный с углом OFC 60° , а FCO 30° градусов. Считая, что площадь наложенного круга с центром O равна площади прямоугольника $ABCD$, требуется найти число π . Решение этой задачи, с которой справляются старшие школьники, я предоставляю выполнить читателям. Ответ таков: $\pi \approx \sqrt{2} + \sqrt{3}$.

К своему удивлению, я обнаружил, что с этой задачей незнакомы не только школьные учителя математики, но и преподаватели вузов. А задача эта примечательна тем, что в ней используются «треугольники Платона», под которыми Платон понимал прямоугольные треугольники с углами в 45° , а также с углами в 60° и 30° градусов при гипотенузе. Платон считал, что на таких треугольниках держится мир.

Что дало основание Платону для такого утверждения, и почему в основу мира он клал геометрическую фигуру, а не число, как это делал, например Пифагор, которого Платон почитал? Связано это, по-видимому, с тем, что древнегреческие математики столкнулись с иррациональными числами, существование которых было неразрывно связано с треугольниками. Благодаря этому обстоятельству серьезно пошатнулась магия (натуральных) чисел, господствовавшая среди древних математиков. Да и только ли среди древних?

¹³ «Евклид», статья С.В. Силкова из компьютерной энциклопедии «История философии» (Минск, 2002).

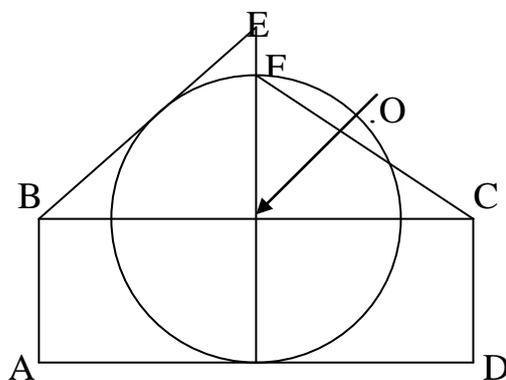


Рис. 1.4. Задача Платона для вычисления числа π

Не желая иметь дело с таким объектом как иррациональное число, например $\sqrt{2}, \sqrt{3}$, древние стали использовать треугольники - более гармоничный объект. Однако, как мы увидим в дальнейшем, магия натуральных чисел снова вернулась в физику, когда сделали первые попытки объяснить оптические спектры химических элементов. Поскольку спектральный анализ оказался важен не только для объяснения микромира, мира атомов и молекул, но и мегамира – мира галактик. А углы между химическими связями в органических веществах и даже в молекуле воды, равно как и углы и плоскости в кристаллографии - разве это не отзвук треугольников Платона? Мы видим, таким образом, что магия чисел и треугольников не канула в Лету и оказалась достойной внимания современной науки. Поэтому не хотелось бы с порога отмахиваться от простых, кажущихся порой наивными представлений древних об устройстве природы, мира. Ведь в них - поиски единого в природе, поиски ее первоначала, от которого современная физика в некоторых своих разделах далеко ушла, но мечтает вернуться.

2.3. Роль математики

Говоря о геометрии физического пространства, мы начали разговор о физике с математики. О чем это свидетельствует? Ведь физика во всех своих частях тесно переплетена с математикой, которую использует, по выражению Р. Фейнмана в качестве аппарата теоретического исследования и языка для своих рассуждений. Но дело не только в этом. Математика живет и своей самостоятельной жизнью, насколько могут быть самостоятельными отдельные науки, вносящие свой вклад в культуру общества и питающиеся его материальными и духовными ценностями.

Вопрос еще и в другом: какова природа математики и что это за наука - естественная или гуманитарная. Дело в том, что когда математика с высокой точностью предсказывает физические явления, это кажется подчас чудом. Так, например, Э. Шрёдингер говорил о «господней квантовой механике», которая стала таковой в результате удачно подобранного математического аппарата, адекватно описывающего то, что происходит на самом деле.

А что означает «происходить на самом деле»? Явно и по умолчанию под этим понимается в естественных науках то, что регистрируется нашими органами чувств. Даже явления микромира, не воспринимаемые невооруженным глазом, могут стать видимыми с помощью приборов. А что является критерием истинности математики? По-видимому, соответствие (иногда, впрочем, очень широко понимаемое) признанным ранее результатам и интуитивное чувство истинности.

Was fruchtbar ist,
Allein ist wahr.

«Лишь плодотворное верно», - писал великий Гете. А т.н. чувство истинности – откуда оно и где «проживает»? Его не найдешь в декартовом пространстве координат, хотя, казалось бы, Декарт причастен к математике. Так, где же «живут» математические истины, которые вовсе не обязаны быть связанными с материей. Это уже не *res extensa* (вещи протяженные), а *res cogitans* (вещи мыслящие), согласно Декарту. Впрочем, математика здесь – не исключение. В физике истинность рассуждений существует тоже не в пространстве координат. Так зачем же физике нужна чужая епархия? Уж не сводит ли она счеты с математикой, кто главнее?

Думается, что основной вопрос не в этом. Современная физика стала дорогой наукой. На ее основе выпускается самая, быть может, наукоемкая продукция – измерительная техника, компьютеры, от которых зависит будущее мировой цивилизации. Для физических исследований строятся дорогостоящие ускорители заряженных частиц, цена которых соизмерима с годовым бюджетом некоторых стран. Поэтому очень хочется знать, туда ли идем? И применить к этим оценкам количественные методы.

Послушаем И. Канта: «С самых ранних времен, до которых простирается история человеческого разума, математика пошла верным путем науки у достойных удивления древних греков", "...но что касается свойственного философии способа познания из понятий в сравнении со свойственным математике способом судить *a priori* на основании одного лишь конструирования понятий, то обнаруживается такая глубокая разнородность философского и математического познания, которая, правда, всегда как бы чувствовалась, но никогда не была сведена к отчетливым критериям»¹⁴.

Впрочем, о взаимоотношении физики с философией, математикой и с другими науками у нас еще будет возможность поговорить. А сейчас вернемся непосредственно к физике.

¹⁴ Кант И. Сочинения в шести томах. Т. 3. М., 1964. С. 84.

РАЗДЕЛ 2. ФИЗИКА МАКРОМИРА

3. Механическая картина мира

Первая научная картина мира была построена в 18 в. трудами Коперника, Галилея, Кеплера, Ньютона и их последователей, среди которых тоже было немало выдающихся математиков.

Замена небесных сфер Аристотеля кеплеровым движением планет по эллиптическим орбитам выдвинула на передний план вопрос о силах, удерживающих планеты на орбитах. Французский философ и математик Р. Декарт (1596–1650) предположил, что все пространство между телами заполнено тончайшей материей. Вихри этого вещества удерживают планеты на их орбитах, а все взаимодействия передаются путем прямого контакта.

В конце 1600-х годов в научных кругах Англии стали обсуждаться альтернативные теории тяготения. Поскольку было известно, что свет ослабляется пропорционально квадрату расстояния, несколько английских ученых, включая Э. Галлея (1656–1743), Р. Гука (1635–1702) и К. Рена (1632–1723), предположили, что могла бы существовать некая подобная сила взаимного притяжения тел. Ни один из них, однако, не дал математического решения этой проблемы.

В 1684 Галлей посетил И. Ньютона (1643–1727), чтобы обсудить проблему тяготения, и, увидев, что тот близок к ее решению, настоял на ускорении работ. Следующие три года Ньютон при поддержке Галлея почти непрерывно трудился над этой проблемой. Объединив исследования Галилея над падающими на Земле телами и кеплеровы законы планетных движений, Ньютон создал строгую теорию тяготения, действительно объединившую Солнце, Землю и планеты в единую систему.

Ньютон изложил свои открытия в *Математических началах натуральной философии* (*Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1687). Все наблюдаемые в Солнечной системе явления выводились в книге Ньютона с математической точностью из нескольких основных принципов и закона всемирного тяготения.

Книга I – математическое описание движения свободного тела под влияние действующих на него сил – утверждает новые принципы механики. Она начинается с определения того, что теперь называют инерцией, массой и импульсом, а затем формулирует три знаменитых ньютоновых закона движения.

Книга II – о движении тел в среде с сопротивлением – в основном опровергает теорию вихрей Декарта.

В Книге III Ньютон применяет свою теорию гравитации фактически ко всем телам Солнечной системы – к планетам, Луне и другим спутникам, к кометам, – для которых имелись точные наблюдения.

Неразрешимое противоречие между понятием о тяготении и действием сил на расстоянии крайне затрудняло распространение теории Ньютона. Тем не

менее, в собственной стране он прошел путь от одинокого эксцентричного профессора Тринити-колледжа в Кембридже до президента Лондонского королевского общества (1703–1727). Хотя и медленно, его математические теории пускали корни.

Сам Ньютон не мог объяснить особенностей движения всех членов Солнечной системы. Невозможно было точно аналитически решить задачу о движении уже трех взаимно притягивающихся тел. Даже приближенное ее решение требовало многих месяцев и даже лет кропотливых вычислений. Поколение талантливых континентальных, в первую очередь французских, математиков – таких, как Алекси Клод **Клеро** (1713–1765), Жан д'Аламбер (1717–1783), Леонард Эйлер (1707–1783), Жозеф Луи Лагранж (1736–1813) и Пьер Симон Лаплас (1749–1827), – успешно разрешило, в большей или меньшей степени, ряд проблем, касающихся движения тел в Солнечной системе, применяя и развивая ньютонову теорию

Кеплера законы - эмпирические законы, описывающие движение планет вокруг Солнца. Установлены И. Кеплером (J. Kepler) в нач. 17 в. на основе наблюдений положений планет относительно звезд¹⁵.

Первый К. з. Все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

Второй К. з. Площади, описываемые радиусами-векторами планет, пропорциональны времени.

Третий К.з. Квадраты периодов обращений относятся как кубы их средних расстояний от Солнца.

Первые два К. з. были опубликованы в 1609, третий - в 1619. К. з. сыграли важную роль в установлении И. Ньютоном закона всемирного тяготения. Решение задачи о движении материальной точки, взаимодействующей по этому закону с неподвижной центральной точкой (невозмущённое кеплеровское движение), приводит к формулировке обобщённых К. з.

1. В невозмущённом движении орбита движущейся точки есть кривая второго порядка, в одном из фокусов которой находится центр силы притяжения.

2. В невозмущённом движении площадь, описываемая радиусом-вектором точки, изменяется пропорционально времени.

3. В невозмущённом эллиптическом движении двух точек произведения квадратов времён обращений на суммы масс центральной и движущейся точек относятся как кубы больших полуосей их орбит:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} * \frac{m_0 + m_1}{m_0 + m_2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (2.1)$$

где T_1 и T_2 - периоды обращения точек с массами m_1 и m_2 , движущихся вокруг центральной точки с массой m_0 по эллипсам с большими полуосями a_1 и a_2 соответственно.

¹⁵ Лит.: Дубошин Г. Н. Небесная механика, 2 изд., М., 1978.

Третий закон, в частности, позволяет приближённо определять массы планет, обладающих спутниками. Пусть спутник с массой m_2 обращается по эллипсу с большой полуосью a_2 вокруг планеты с массой m_1 , которая, в свою очередь, движется вокруг Солнца по эллиптической орбите с большой полуосью a_1 . Тогда если из наблюдений известны значения a_1 и a_2 , а также величины периодов обращений планеты вокруг Солнца (T_1) и спутника вокруг планеты (T_2), то при условии $m_1 > m_2$ из третьего закона можно определить величину m_1 в единицах массы Солнца m_0 :

$$1 + \frac{m_0}{m_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^3. \quad (2.2)$$

Были научно объяснены формы орбит планет солнечной системы. С тех пор протяженность мира увеличилась на много порядков величины, но простота и ясность первой научной картины завораживает. Хотя в начале, надо признать, там тоже хватало забот: и внутринаучная конкуренция, и церковь.... Да и сама механика была построена логично и точно не сразу. Она все время улучшалась трудами талантливых исследователей. От уравнений Ньютона до уравнений Гамильтона прошло немало лет.

3.1. Уравнения Гамильтона

В рамках классической механики законы природы выражаются с помощью уравнений Гамильтона: (канонические уравнения механики) - дифференциальных уравнений движения голономной механической системы в канонических переменных, которыми являются s обобщённых координат q_i и s обобщённых импульсов p_i , где s - число степеней свободы системы.

Выведены У. Р. Гамильтоном (W. R. Hamilton) в 1834¹⁶. Для составления уравнения Гамильтона надо в качестве характеристической функции системы знать Гамильтона функцию $H(g_i, p_i, t)$, где t - время. Тогда, если все действующие на систему силы потенциальны, уравнения Гамильтона имеют вид

$$\frac{dq_j}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_j}, \quad \frac{dp_j}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_j} \quad (j = 1, 2, \dots, s), \quad (2.3)$$

где q_j, p_j - пространственные координаты и импульсы соответственно, а s - число степеней свободы системы. Функция Гамильтона

$$H(q_j, p_j) = T + U, \quad (2.4)$$

где T - кинетическая, а U - потенциальная энергии.

¹⁶ ГАМИЛЬТОН Уильям Роуан (1805-65), ирландский математик, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (1837). Дал точное формальное изложение теории комплексных чисел. Построил систему чисел — кватернионов. В механике дал общий принцип наименьшего действия.

До появления уравнений электродинамики Максвелла эти уравнения представлялись полным сводом законов природы. Начало такому подходу дал в XVIII в. Исаак Ньютон, который сформулировал его следующим образом: «Я ... подозреваю, что [всякое явление природы] может быть целиком описано действием определенных сил, посредством которых частицы тел ... либо притягиваются друг к другу, связываясь в правильные формы, либо отталкиваются, удаляясь друг от друга».

В XIX в. физик, физиолог и психолог Герман Гельмгольц выразил подобные взгляды следующими словами: «Задачей физики является сведение всех явлений природы к силам притяжения и отталкивания, интенсивность которых зависит от расстояния между материальными телами. Только решив эту задачу, мы можем быть уверены в познаваемости природы». Явлением природы Гельмгольц считал, разумеется, и жизнь.

Трудами создателей механики наблюдение и эксперимент становятся неотъемлемой частью науки. Раньше ручной труд считался уделом рабов. Теперь благодаря эксперименту и его математическому описанию стали считать, что мир состоит из взаимодействующих частиц, находящихся в непрерывном движении. Все действующие причинно-следственные связи сотворены Богом. Открывая законы функционирования мира, созданные Богом, ученые смогут предсказывать события в будущем. Появляются достаточно совершенные механические приборы: термометры, барометры, логарифмические линейки, маятниковые часы и др.

Часы, подобно компьютерам в XX в. оказались причиной технологического прорыва. Правда, в древности автоматы уже применялись, особенно в Китае. Часы символизировали собой модель мира в целом. Мир считался заведенным Богом, как часы, и дальше функционировал сам по законам Им данным. Такой подход в религии называется деизмом. Подобные взгляды были характерны для Иоганна Кеплера, Рене Декарта, Христиана Вольфа («учителя» М.В. Ломоносова) и др. Из идеи божественного предопределения родилось философское течение детерминизма и редукционизма. Ярким техническим воплощением механического подхода стала вычислительная машина, которую создал Чарльз Беббидж (1792-1871). Его машина производила вычисления быстрее человека, могла играть в шахматы, шашки и др. игры.

В качестве первопричины явлений, по поводу которой И. Ньютон говорил: гипотез не делаю, выступал по-прежнему Бог. Подобная аналогия как бы заимствована из сценического оснащения античной трагедии, в которой в ходе действия мог участвовать «бог из машины», устранявший противоречия, когда они заходили так далеко, что их разрешение становилось, казалось бы, не под силу человеку. Как мы увидим из дальнейшего, наука постепенно отходила от идеи бога и уже в механистическую эпоху не кто иной, как Лаплас, отвечая Наполеону по поводу созданной им модели вселенной, заявил, что гипотеза бога ему не понадобилась. Еще Ньютон, как отмечено выше, заявлял: «Гипотез не делаю». Но так ли это было на самом деле? Исследуя этот вопрос, С.И. Вавилов считал Ньютона мастером гипотез. В чем же дело? Возможно, такое утверждение понадобилось Ньютону, чтобы отмежеваться от т.н. скрытых качеств, при-

писываемых природе. Он предпочел сведение природных закономерностей к неким принципам. Однако, во-первых, принципы весьма напоминали гипотезы, а во-вторых, не раскрывали причин явлений, отвечая в основном на вопрос «как?», но не «почему?». В самом деле, вопрос о причине тяготения оставался и остается поныне (!) открытым. Ньютон писал: «Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря».

Пространство и время в механике Ньютона были отделены друг от друга, т.е. существовали независимо, и рассматривались как абсолютные. И это несмотря на то, что, как было показано самим Ньютоном, никакому событию нельзя приписывать абсолютного положения в пространстве, ибо законы движения одинаковы в инерциальных системах. Но это противоречило идее абсолютного Бога, и Ньютон оставил в силе абсолютное пространство (существовавшее еще у Аристотеля), а также абсолютное время.

3.2. Основные положения механической картины мира.

Время считается обратимым (так построены уравнения)

Все процессы детерминированы

Пространство и время абсолютны и не связаны с движением тел

Все формы движения материи редуцируются к механическому движению

Принцип дальнего действия: силы распространяются в пустом пространстве мгновенно.

Известный персидский поэт средневековья Омар Хайям свои гениальные предчувствия на тему детерминизма неоднократно облакал в поэтическую форму:

В детстве ходим за истиной к учителям,
После — ходят за истиной к нашим дверям.
Где же истина? Мы появились из капли.
Станем — прахом. Вот смысл этой сказки, Хайям.

«Недостатки» механической картины мира.

1. Отсутствие причин притяжения тел.
2. Силы (притяжения) учтены только радиальные.
3. Неясно, что есть масса сама по себе, а не в «отношениях».

Итак, механическая картина мира описывается системой уравнений и имеет предсказательную силу. В силу этого при детальном рассмотрении какого-либо явления принято говорить о его «механизме». Задачи механики обусловили существенный прогресс в математике, хотя математика по своей сути не является естественной наукой. Открытие дифференциального и интегрального

исчислений находилось в тесной связи с задачами механики и оптики. Впрочем, по такому поводу было бы уместно говорить о духе времени, который влиял на творчество многих ученых. Тем более что Лаплас, Пуассон, Гамильтон разработали математический аппарат, выходящий за рамки потребностей механики. Вспомним, например, понятие потенциала. Математики чутко улавливали дух времени.

Система уравнений – это хорошо. Но где же, спросите вы, собственно физика? Да и в чем она проявляется? Количественные соотношения – это скорее по ведомству математики. А где же качественные? А то, чего доброго, некоторые современные философы совсем уж примут физику за бескачественную науку! Да и можно ли двигать физику вперед на основе одних лишь математических моделей? Ведь прогресс в естественных науках не обходится без изобретений. А изобретения в физике не делаются, как правило, на основе математических соотношений. Нужны качественные рассуждения, важные для постановки эксперимента, которые и делают физику самостоятельной наукой. Без них невозможно делать изобретения, т.к. трудно сформулировать противоречия, которые должны разрешать изобретения.

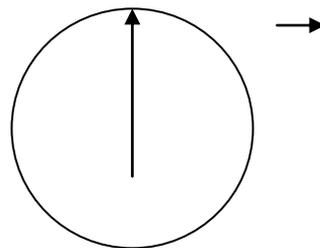
П. Эрэнфест писал: «Физика проста, но неуловима». Впрочем, так ли уж неуловима? Для прояснения этого вопроса, рассмотрим на качественном уровне одну довольно простую модель механического движения.

3.3. Система Земля - Луна

Эта наиболее близкая к нам планетная система была предметом пристального внимания И. Ньютона на протяжении многих лет. То, что удалось сделать в этом отношении, его не вполне удовлетворило. Один из аспектов проблемы указанных небесных тел, который нам не удалось найти изложенным в доступной форме, будет описан ниже.

Закон всемирного тяготения описывает форму орбиты планеты и само ее (орбиты) существование. А как объяснить тот факт, что Луна, например, повернута к Земле одной своей стороной? Вот тут-то важно понять явление сначала качественно, создать физическую модель явления, а на ее основе можно строить и модель математическую. Попробуем предложить некую качественную модель движения Луны, имея в виду поставленную задачу. Это заодно продолжит уже начатую нами линию «физика на пальцах», достаточно популярную в физике, причем не только элементарной.

1



2

Рис. 2.1. Монеты в исходном положении

Возьмем две монеты одинакового достоинства, имеющие, следовательно, одинаковые диаметры. На рис. 1 показано их исходное положение. Из рисунка видно, что обе монеты ориентированы (об этом говорит направление стрелки) одинаково. Теперь заставим монету 1 катиться по монете 2 без скольжения так, чтобы монета прошла путь в половину окружности по монете 2. Спрашивается, в каком положении окажется монета 2 относительно своей начальной угловой ориентации? Нетрудно непосредственно, опытным путем убедиться, что эта ориентация отражена на рис. 5, то есть она совпадает с исходной.

Получается, что, пройдя половину окружности по монете 1, монета 2 повернулась на полный оборот вокруг своей оси. Как такое могло произойти? Ситуацию поясняет рис. 6. Теперь монета 1 не имеет возможности вращаться вокруг собственного центра, а может совершать вращательное движение только вокруг центра монеты 2. После прохождения полуокружности монеты 2 монета 1 оказывается в угловом отношении повернута относительно своего исходного положения не на угол 360 градусов, как раньше (рис. 5), а на угол 180 градусов. При этом монета 1 все время повернута к монете 2 одной стороной. Это объясняет и предыдущий результат. Там монета не только вращалась вокруг центра монеты 2, но и катилась по этой монете, что позволило ей вращаться вдвое быстрее, чем в случае, представленном на рис. 6.

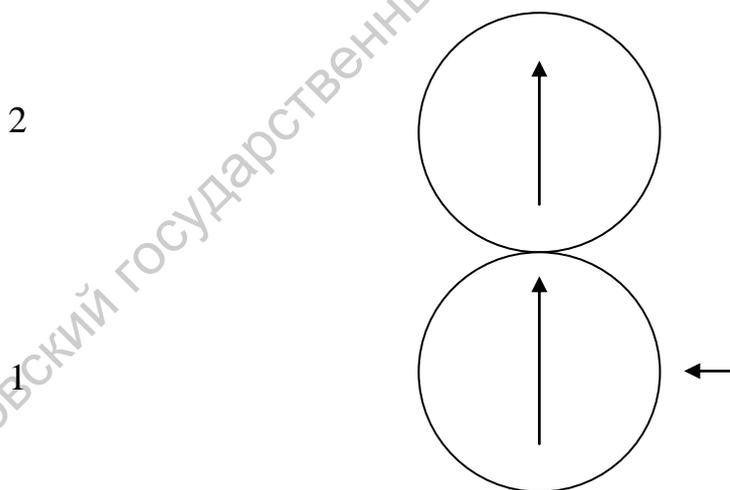


Рис. 2.2. Монеты в конечном положении

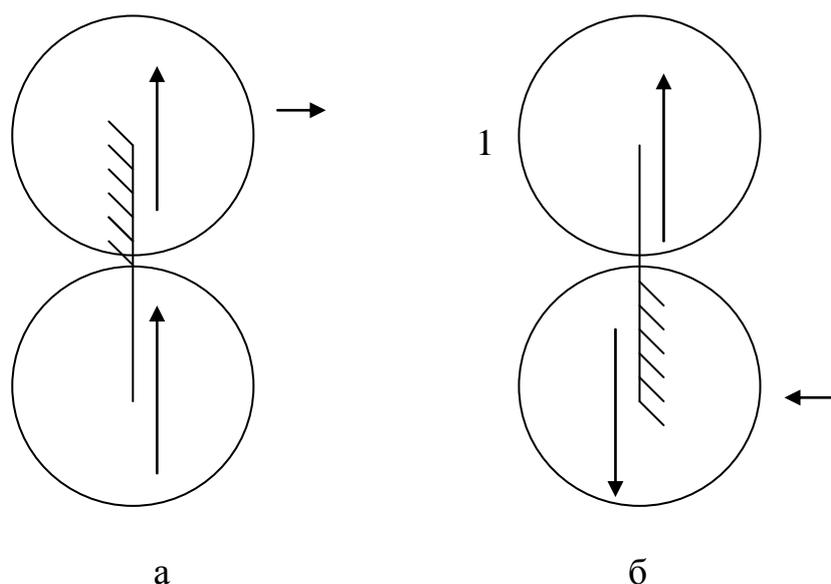


Рис. 2.3. Движение монеты 1 с закрепленной осью, вращающейся относительно центра монеты 2. Монета 1 не совершает качения по окружности монеты 2.

Как применить, спросите вы, рассмотренный пример к движению Луны? Что в этом случае может выполнять роль фиксатора оси вращения, не позволившего монете 1 (аналогу Луны) вращаться вокруг собственной оси? Ответ таков. Жесткой связи в движении планет, конечно, нет, но аналог жесткой связи возможен. Им может послужить несовпадение центра масс Луны с ее геометрическим центром. Конечно, несовпадение центра масс с геометрическим центром легче ожидать от тела менее правильной геометрической формы. И такие тела в Солнечной системе существуют. Это Фобос и Деймос – спутники Марса, которые тоже повернуты одной стороной к центральному телу.

Физическая модель предложена. Что же остается на долю математической модели? Ей придется заняться расчетом необходимой величины эксцентриситета Луны, т.е. отклонения центра масс от геометрического центра нашего небесного спутника. И если величина эксцентриситета окажется в разумных пределах, то наша качественная модель подтвердится количественно и, тем самым, получит окончательное право на существование. Для превращения предложенной модели из качественной гипотезы в количественную теорию необходимо рассчитать, хватит ли известного из других наблюдений эксцентриситета Луны (Луна вытянута по направлению к Земле под влиянием притяжения последней) для реализации всего явления односторонней «повернутости» Луны к Земле. Следует отметить в заключение, что автор пока не нашел в литературе другого простого объяснения явления «односторонности» в движении Луны.

3.4. Детерминизм и отклонения от него

Классическая механика, о которой шла речь до сих пор, однозначно выводит следствие из причины и демонстрирует детерминизм (причинно-следственную связь). Однако, как это было замечено на примере закона обратных квадратов, могут существовать предельные случаи, в которых содержится некий намек, что процессы могут происходить и не так. Попробуем найти указание на выход за пределы детерминизма внутри самой классической механики.

Математические трудности начинаются здесь при рассмотрении проблемы многих тел (больше двух). Рассмотрим поэтому качественно так называемую бильярдную проблему. В решетку из жестко закрепленных шаров влетает шар, обладающий определенной (по направлению и величине) начальной скоростью. Испытав несколько столкновений, он вылетает из системы с некой (изменившейся по сравнению с начальной) скоростью. Зафиксируем эту конечную скорость и попробуем повторить эксперимент. Как можно более тщательно соблюдаем начальные и граничные условия и убедимся, что на выходе значение скорости повторить не удастся. Более того, разброс от эксперимента к эксперименту очень большой, так что говорить в этом опыте о причинно-следственной связи становится затруднительным. В данном случае это связано с тем, что ничтожно малое отклонение в начальных и граничных условиях на входе приводит к большим изменениям на выходе системы. И хотя причинно-следственная связь качественно и прослеживается, практически реализовать ее крайне сложно, если вообще возможно.

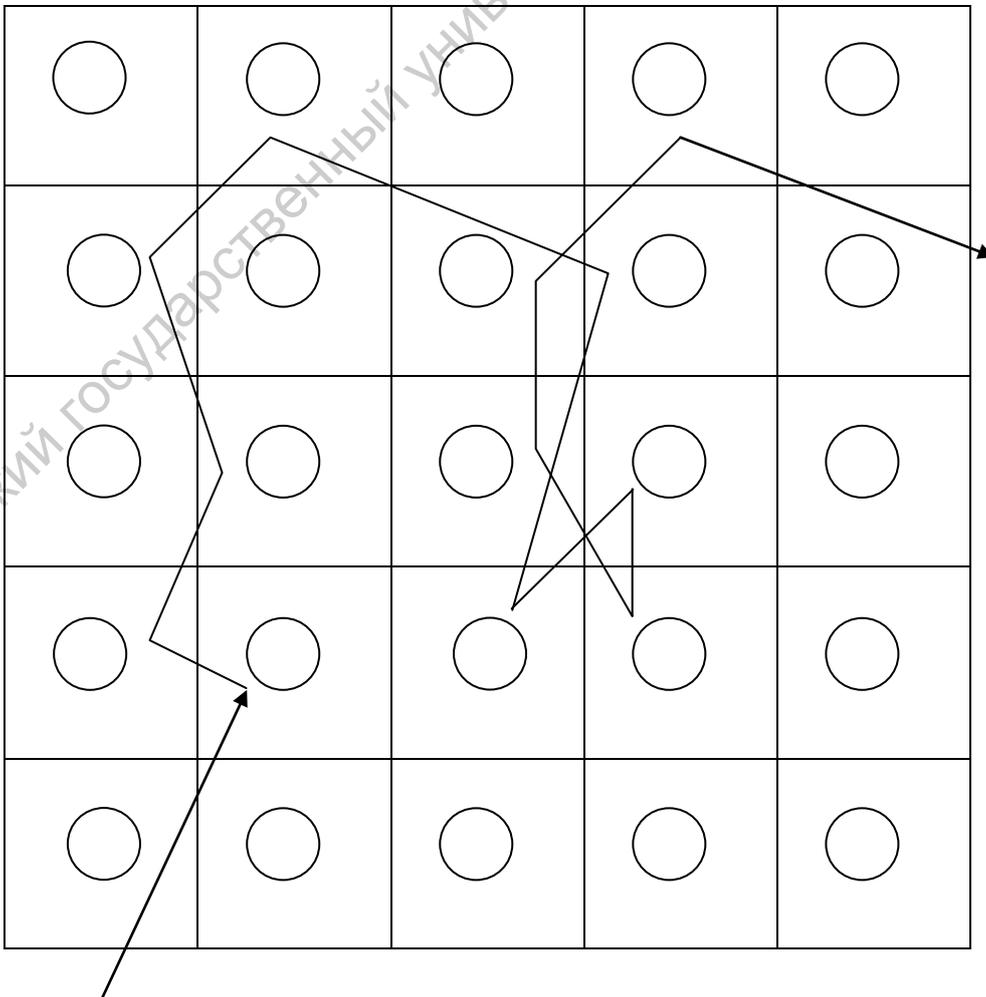


Рис. 2.4. Пример, иллюстрирующий простой детерминизм (и отклонение от него). Движущийся шар отскакивает от упругой поверхности других (неподвижных) шаров бесконечной решетки. Самое незначительное отклонение от начальной траектории заметно усиливается при многократных соударениях, нарастая с каждым соударением.

Для того чтобы предсказать траекторию движения шара, мы должны знать первоначальное направление его движения с колоссальной точностью. Если шар движется со скоростью 100 км/час, то чтобы последовательно предсказать его путь в течение часа, нам надо знать изначальное направление его движения (в градусах) с точностью в два миллиона знаков после запятой. Для записи такого числа потребовалось бы более 700 страниц. А если учесть еще и движение шаров, например, их колебания относительно положений равновесия, задача станет еще менее обозримой. Сказанное нам пригодится при рассмотрении явлений микромира, где нередко приходится учитывать огромное число частиц.

4. Термодинамика

Деятельность живой материи, хотя и основана на законах физики, установленных к настоящему времени, подчиняется до сих пор не известным другим законам физики....

Эрвин Шредингер

Речь пойдет о разделе прикладной физики или теоретической теплотехники, в котором исследуется превращение движения в теплоту и наоборот. В термодинамике рассматриваются не только вопросы распространения теплоты, но и физические и химические изменения, связанные с поглощением теплоты веществом, а также, наоборот, выделение теплоты в ходе физических и химических превращений.

Термодинамика находит широкое применение в физической химии и химической физике при анализе физических и химических процессов, в современной физиологии и биологии, в двигателестроении, теплотехнике, авиационной и ракетно-космической технике. Первоначально в термодинамике много внимания уделялось обратимым процессам и равновесным состояниям, так что более подходящим для нее казалось название «термостатика», но *благодаря С. Аррениусу (1859–1927) и Г. Эйрингу (1901–1981) получило весьма основательную разработку ее применение к анализу скоростей химических реакций* (химической кинетике).

В настоящее время главной проблемой в термодинамике является ее применение к необратимым процессам, и уже достигнуты большие успехи в построении теории, по широте охвата сравнимой с термодинамикой обратимых процессов.

4.1. Энергия

Для той физической величины, которую мы теперь называем энергией, долгое время употреблялся термин «живая сила», введенный И. Ньютоном (1643–1727). Но поскольку «живую силу» можно было спутать с обычной силой, последнюю приходилось для ясности называть «мертвой силой», что нельзя признать удачным. *Специальный термин «энергия» был введен в 1807 Т. Юнгом (1773–1829).*

Одним из видов энергии является работа, которая совершается, когда тело движется, преодолевая действие некой силы. Примером может служить подача насосом воды в водонапорную башню. О воде в башне говорят, что она имеет потенциальную энергию. Благодаря гравитационному притяжению Земли существует возможность обратного преобразования этой энергии в кинетическую, т.е. в энергию движения воды, текущей по трубам. Когда вода в трубе в конце концов останавливается из-за внутреннего трения, или вязкости, эта энергия оказывается превратившейся в теплоту, т.е. тепловую энергию, которая рассеивается в окружающей среде.

Еще в 1620 Ф. Бэкон высказал предположение, что теплота есть просто другая форма движения, но лишь в 1789 это с несомненностью установил Б. Томпсон (Румфорд), наблюдая за выделением теплоты при расверливании ствола пушки. Дополнительным подтверждением явились опыты Х. Дэви 1799.

Эти опыты и наблюдения говорили о том, что тепловая и механическая энергия – одно и то же и что, вероятно, можно найти экспериментально механический эквивалент теплоты, т.е. количество работы в механических единицах, эквивалентное данному количеству теплоты в тепловых единицах.

Механический эквивалент теплоты. Заметив, что температура воды в медицинской колбе повышается, если ее несколько минут встряхивать, Ю. Майер в 1842 вычислил механический эквивалент теплоты по разности удельных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме. В ту пору точные значения этих удельных теплоемкостей еще не были известны, а потому его результат был не совсем верным, хотя и правильным по порядку величины. В 1845 Дж. Джоуль точно измерил количество теплоты, получаемое при преобразовании механической работы в тепловую энергию, и уточнил результат Майера.

Работа. Если некое вещество находится под ограничивающим воздействием внешней силы, например атмосферного давления P , то при изменении его объема V , скажем расширении, вследствие движения против действующей силы совершается работа. Полную совершаемую работу можно найти как площадь зависимости силы от соответствующего размера, как показано на рис. 2.1, где площадью участка, выделенного ретушью, представлена работа, совершаемая газом при расширении от V_1 до V_2 . Такой способ ее определения необходим,

поскольку давление может меняться. При малом изменении объема давление намного не изменится, так что малое количество совершаемой работы будет равно:

$$(1) \quad dW = PdV.$$

Следовательно, полная совершаемая работа

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV.$$

При быстром сжатии газа некоторая часть работы, совершаемой над ним, может заметно повысить его температуру. Если газ находится в теплоизолированном сосуде (или сжимается столь быстро, что не успевает хотя бы частично отдать свою теплоту), такое изменение объема называется адиабатическим. Если же газ не теплоизолирован, то происходит теплоотдача, и газ сохраняет температуру окружающей среды. Такое изменение объема называется изотермическим.



Рис. 2.5. Приращение энтропии как рост неупорядоченности системы

«Полезность» энергии. Полное преобразование работы в теплоту вполне возможно, но обратный процесс преобразования всей теплоты в эквивалентную ей работу невозможен. К такому выводу еще в 1824 пришел путем теоретических рассуждений французский физик Николя Леонар Сади Карно (1796–1832). Рассматривая полный цикл обратимых изменений рабочего тела в тепловой машине, в конце которого это тело возвращается в исходное состояние, он показал, что максимальный КПД преобразования теплоты в работу зависит не от природы рабочего тела, а только от максимальной температуры, при которой подводится теплота, и от минимальной температуры, при которой она отводится. Полное преобразование теплоты в работу было бы возможно лишь в том случае, если бы минимальная температура была равна абсолютному нулю, при которой рабочее тело не имело бы никакой тепловой энергии.

На существование абсолютного нуля указывает закон расширения газов. Поскольку при охлаждении от 0 до -1°C газы сжимаются на $1/273$, можно представить себе некий «идеальный» газ, который не конденсируется, как реальные газы, но с понижением температуры продолжает сжиматься, пока его объем не уменьшится до нуля при -273°C . Это было бы абсолютным нулем температуры

для тепловой машины, рабочим телом которой является идеальный газ. Проведя гораздо более сложные рассуждения, У. Томсон (Кельвин) (1824–1907) доказал, что это действительно абсолютный нуль температуры, и ввел названную его именем «термодинамическую» шкалу температуры T (шкалу Кельвина), в соответствии с которой $T = 273,16 + t^{\circ}\text{C}$.

4.1.1. Первое начало термодинамики. Для Готфрида Вильгельма Лейбница (1646–1716) было уже неоспоримым, что в консервативной системе (подобной гравитационному полю) сумма кинетической и потенциальной энергий остается неизменной, какие бы преобразования одной в другую ни происходили. Простой пример – маятник, кинетическая энергия которого периодически переходит в потенциальную и обратно, причем это могло бы продолжаться до бесконечности, если бы энергия не рассеивалась из-за трения. Однако имеется трение в подвесе, а также сопротивление воздуха, тоже обусловленное трением. Поэтому маятник, в конце концов, теряет кинетическую энергию своего видимого движения, но опыты Румфорда и других ученых свидетельствовали о том, что энергия лишь превращается в теплоту, и в результате этого повышается температура маятника и окружающей среды. Таким образом, строго периодические колебания маятника превращаются в хаотическое движение его молекул и молекул окружающей среды.

Все изложенное находит общее выражение в первом начале термодинамики – законе сохранения энергии. Согласно этому закону, во всех таких преобразованиях энергия не возникает и не исчезает, она лишь меняет форму. На это указал в 1837 замечательный, но почти неизвестный мыслитель К. Мор в своей статье *О природе теплоты (On the Nature of Heat)*: «При подходящих условиях энергия может проявляться как движение, слипание, электричество, свет, теплота и магнетизм». **Закон сохранения энергии был четко сформулирован в 1847 Германом Гельмгольцем** (1821–1894), но и после этого универсальный характер закона не сразу получил признание. В 20 в. его пришлось еще более обобщить, включив в него теоретически установленное А. Эйнштейном соотношение $E = mc^2$ между массой m и энергией E (c – скорость света), из которого следует, что сумма массы и энергии остается неизменной.

4.1.2. Второе начало термодинамики. Хотя полная энергия изолированной системы остается постоянной, **теплота передается от нагретой части системы к более холодной**, и, если эти части не изолированы друг от друга, их температура, в конце концов, становится одинаковой. Данное положение, известное нам из опыта повседневной жизни, иногда называют **«нулевым» началом термодинамики**.

В результате такого выравнивания внутренних температур изолированная система переходит в свое наиболее вероятное состояние, в котором движение предельно хаотично. Такое самопроизвольное стремление к состоянию с наивысшей степенью хаотичности есть, иначе говоря, **стремление к максимальной энтропии, которую можно рассматривать как меру «бесполезности» энергии** в термодинамической системе. Суть второго начала термодинамики, сформулированного в 1850 Рудольфом Клаузиусом (1822–1888), и состоит в том, что в изолированной системе внутреннее распределение энергии самопро-

извольнo всегда изменяется так, что энтропия достигает максимального значения ценой уменьшения полезной части энергии. В силу этого невозможен вечный двигатель второго рода (перпетуум-мобиле II)¹⁷.

Необратимое нарастание энтропии в тепловых процессах непонятно тем, кто только начал знакомиться с термодинамикой, но его нетрудно объяснить, опираясь на теорию вероятностей. Представим себе две игральные кости, лежащие вверх шестерками. Если мы потрясем их, прежде чем снова выбросить, то вероятность выпадения двух шестерок будет мала – 1:36. Таким образом, можно сказать, что беспорядочное движение (перемешивание) игральнoх костей, подобно хаотическому движению молекул, соответствующему их тепловой энергии, оказывается причиной перехода из менее вероятного состояния в более вероятное. Если же у нас миллионы игральнoх костей (атомов и молекул, для которых проводятся термодинамические расчеты), то вероятность одновременного выпадения всех шестерок столь ничтожно мала, что система просто не может не перейти в одно из более вероятных состояний.

Если теплота – беспорядочное колебательное движение молекул, то при охлаждении энтропия системы должна уменьшаться. Когда же тепловое движение полностью прекратится, система будет при абсолютном нуле температуры. Естественно предположить, что при такой температуре энтропия равна нулю.

4.1.3. Тепловой насос. Подумаем однако, обязательно ли превращать всю энергию «бесконечного» резервуара в механическую работу или тепловую энергию? Не достаточно ли для практических нужд полезного использования лишь части этого резервуара? Например, путем отнятия энергии от холодильника? Действительно, такие тепловые машины существуют и носят название тепловых насосов.

Примером является бытовой холодильник или климатическая установка, работающие на нагрев. Несколько десятилетий назад в партийной печати СССР шумели баталии по этому поводу, в которых видные ученые «клеямили позором» изобретателей теплового насоса – коллектив инженеров под руководством П.К. Ощепкова.¹⁸

В качестве примера рассмотрим случай, когда температура наружного воздуха $t_2=0^\circ\text{C}$, а внутри дома тепловой насос должен поддерживать темпера-

¹⁷ ВЕЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (лат. *perpetuum mobile* — перпетуум мобиле), 1) вечный двигатель 1-го рода — воображаемая, непрерывно действующая машина, которая, будучи раз запущенной, совершала бы работу без получения энергии извне. Вечный двигатель 1-го рода противоречит закону сохранения и превращения энергии и поэтому неосуществим. 2) Вечный двигатель 2-го рода — воображаемая тепловая машина, которая в результате совершения кругового процесса (цикла) полностью преобразует теплоту, получаемую от какого-либо одного «неисчерпаемого» источника (океана, атмосферы и т. п.), в работу. Действие вечного двигателя 2-го рода не противоречит закону сохранения и превращения энергии, но нарушает второе начало термодинамики, и поэтому такой двигатель неосуществим. (См. например Яворский Б.М., Селезнёв Ю.А. Справочное пособие по физике для поступающих в вузы и самообразования. Изд. 4-е. — М.: «Наука», 1989, 576 с.).

¹⁸ О легкомысленной погоне за научными сенсациями //Правда, 1959, 22 ноября.

"Чудо" не состоялось. Еще раз о легкомысленной погоне за научными сенсациями //Правда, 1987, №173, 22 июня.

Пока обсуждаем - за рубежом производят //Известия, 1987, №38, 7 февраля. О чуде, которое все-таки было //Техника - молодежи, 1988, №9, с.22-24.

туру $t_1 = +20^\circ \text{C}$. Для этих значений температур максимальный отопительный коэффициент равен:

$$\psi_{\max} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{293\text{K}}{293\text{K} - 273\text{K}} = 14,5.$$

Полученная величина означает, что пользуясь тепловым насосом, работающим за счет электрической энергии, питающей двигатель, мы можем «накачать» в помещение в 14,5 раз большее количество теплоты, чем получили бы при той же затрате энергии от «обычного» электронагревательного прибора¹⁹.

Беда ранних исследователей этого явления (П.К. Ощепков и др.) состояла в том, что они неосторожно назвали т.н. отопительный коэффициент коэффициентом полезного действия, который согласно второму закону термодинамики не может превышать единицу.

4.1.4. Третье начало термодинамики. Чтобы найти абсолютное значение энтропии, необходимо знать теплоемкость при абсолютном нуле температуры. Измерив теплоемкость многих веществ при температурах, очень близких к абсолютному нулю, Вальтер Нернст (1864–1941) пришел к выводу, что теплоемкость всех кристаллических веществ при абсолютном нуле температуры равна нулю. Эта «тепловая теорема Нернста» теперь называется третьим началом термодинамики. Ее значение в том, что она позволяет сравнивать между собой энтропии разных веществ, так как все они равны нулю при абсолютном нуле температуры.

4.2. Термодинамические функции и энтропия

4.2.1. Внутренняя энергия. Когда к системе подводится некоторое количество теплоты ΔQ , за счет этой теплоты, как было показано ранее на примере цикла Карно, может быть совершена лишь определенная работа ΔW , так что часть полученной тепловой энергии система теряет. Эти две величины, вообще говоря, неодинаковы, и, следовательно, система либо теряет, либо приобретает энергию, равную их разности. Предположим, что эта разность энергий остается в системе в виде т.н. внутренней энергии E . Тогда последняя увеличится от E до $(E + dE)$, причем

$$(2) \quad dE = \delta Q - \delta W,$$

где δQ и δW – бесконечно малые приращения.

Вообще говоря, эти приращения не являются независимыми (почему они и обозначены здесь символом δ в отличие от приращения dE). Так, поглощение теплоты обычно сопровождается изменением объема и, следовательно, совершением работы против внешнего давления. И наоборот, если допускается расширение, то оно обычно сопровождается поглощением теплоты, отбираемой у окружающей среды. Никакие ограничения, налагаемые реально на систему, не могут полностью исключить такого взаимодействия, но мысленно можно представить себе идеальную теплоизоляцию ($\delta Q = 0$) или строго выполняющееся условие постоянного объема ($\delta W = 0$), так же как в теоретической механике вводятся понятия идеально гладких и идеально твердых тел. Только в идеаль-

¹⁹ Физика. Учебное пособие для 10 класса. Под ред. А.А.Пинского. М., 1995. С. 197

ных условиях, когда δQ и δW независимы друг от друга, приращение δQ или δW можно рассматривать как полный дифференциал, тогда как их разность dE всегда является таковой.

4.2.2. Энтродия²⁰. Тепловая энергия $\delta Q'$, которая *не может быть преобразована в работу*, пропорциональна нижней температуре T , так что можно записать $\delta Q' = TdS$, где dS – приращение энтропии S системы. Как и E , величина S является характеристикой самой системы, а потому мы обозначаем ее приращение буквой d , а не δ .

Обозначив через δW работу, которую можно получить за счет теплоты δQ , можно написать

$$(3) \quad \delta W = \delta Q - \delta Q' = \delta Q - TdS.$$

Если рабочее тело в результате некоего термодинамического процесса не возвращается в исходное состояние, то значительная часть энергии оказывается бесполезной с точки зрения совершения работы, и внутренняя энергия увеличивается на соответствующую разность dE . Увеличение внутренней энергии может проявиться в изменении физического состояния рабочего тела, например в переходе из твердого в жидкое состояние (плавлении) или из жидкого в газообразное (испарении). Такая тепловая энергия называется теплотой плавления и теплотой парообразования соответственно. Повышение внутренней энергии может быть связано также с химическими изменениями (диссоциацией, разрывом связей) и даже с делением ядер.

Л. Больцман показал, что энтропия S пропорциональна логарифму вероятности состояния w , а коэффициентом пропорциональности служит постоянная Больцмана k :

$$S = k \ln w.$$

4.3. Термодинамика неравновесных процессов

То же, что и термодинамика необратимых процессов. Классическая термодинамика дает полное количественное описание равновесных (обратимых) процессов. Для неравновесных процессов она устанавливает лишь неравенства, указывающие направления процессов. Основная задача ТНП – количественное изучение неравновесных процессов, для состояний, не сильно отличающихся от равновесного. Система делится на части, каждая из которых состоит из достаточно большого числа частиц. К этим частям применяются 1-е и 2-е начала термодинамики обратимых процессов. Части системы обмениваются между со-

²⁰ ЭНТРОПИЯ (от греч. entropia — поворот, превращение) (обычно обозначается S), функция состояния термодинамической системы, изменение которой dS в равновесном процессе равно отношению количества теплоты dQ , сообщенного системе или отведенного от нее, к термодинамической температуре T системы. Неравновесные процессы в изолированной системе сопровождаются ростом энтропии, они приближают систему к состоянию равновесия, в котором S максимальна. Понятие «энтропия» введено в 1865 Р. Клаузиусом. Статистическая физика рассматривает энтропию как меру вероятности пребывания системы в данном состоянии (Больцмана принцип). Понятием энтропии широко пользуются в физике, химии, биологии и теории информации.

бой потоками массы, импульса и энергии через градиенты термодинамических параметров.

Уравнение баланса энтропии S:

$$\rho \frac{dS}{dt} = -\text{div} J_s + \sigma \quad (2.5),$$

где σ - локальное производство энтропии на единицу объема в единицу времени, J_s - плотность потока энтропии, которая выражается через плотности потока теплоты, потока диффузии. Энтропия, в отличие от массы, энергии и импульса, не сохраняется, а возрастает со временем в элементе объема вследствие необратимых процессов (скорость возрастания обозначают σ). Положительность производства энтропии ($\sigma \geq 0$) выражает в ТНП закон возрастания энтропии.

Производство энтропии определяется только необратимыми процессами (например, диффузией, теплопроводностью, вязкостью) и равно:

$$\sigma = \sum_i J_i X_i \quad (2.6),$$

где J_i - потоки (например, диффузионный поток, тепловой поток), а X_i - сопряженные им термодинамические силы, т.е. градиенты термодинамических параметров, вызывающие отклонение от равновесного состояния.

4.3.1. Феноменологические уравнения. ТНП исходит из того, что при малых отклонениях системы от термодинамического равновесия возникающие потоки линейно зависят от термодинамических сил X и описываются феноменологическими уравнениями типа

$$J_i = \sum_k L_{ik} X_k \quad (2.7),$$

где L_{ik} - кинетические (феноменологические) коэффициенты, или коэффициенты переноса, которые рассчитывают или определяют опытным путем.

В прямых процессах термодинамическая сила X_k вызывает поток J_k , напр. градиент температуры вызывает поток теплоты (теплопроводность), **градиент концентрации** - поток вещества (диффузию), **градиент скорости** - поток импульса (который определяет вязкость), электрическое поле - электрический ток (электропроводность). Такие процессы характеризуются онсагеровскими кинетическими коэффициентами, пропорциональными коэффициентам теплопроводности, диффузии, вязкости, электропроводности, которые также называются кинетическими коэффициентами или коэффициентами переноса. Так например **градиент температуры** может вызывать поток вещества в многокомпонентных системах (термодиффузия), а градиент концентрации - поток теплоты.

В стационарном состоянии величина производства энтропии минимальна при заданных внешних условиях, препятствующих достижению равновесия (теорема Пригожина²¹, согласно которой **в состоянии термодинамического равновесия производство энтропии равно нулю**). Одна из основных теорем

²¹ Илья Романович Пригожин (1917-2003), бельгийский физик российского происхождения. Лауреат Нобелевской премии по химии (1977 г.) за вклад в теорию термодинамики необратимых процессов).

ТНП – теорема Онсагера²², доказанная им в 1931 г. Она устанавливает свойства симметрии кинетических коэффициентов:

$$L_{ik} = L_{ki} , \quad (2.8)$$

если нет магнитного поля и вращения системы как целого. Если же на систему действует магнитное поле \mathbf{H} или она вращается с угловой скоростью ω , то, согласно теореме Онсагера,

$$L_{ik}(\mathbf{H}) = L_{ki}(-\mathbf{H}); \quad L_{ik}(\omega) = L_{ki}(-\omega) . \quad (2.9)$$

Здесь кинетические коэффициенты L_{ik} имеют тот же смысл, что и в (2.7).

Теорема Онсагера является следствием микроскопической обратимости, которая выражается в инвариантности уравнений движения частиц, из которых состоит система, относительно обращения времени. Инвариантность относительно обращения времени означает, что при изменении направления скоростей всех частиц на обратное (при одновременном изменении направления магнитного поля и угловой скорости вращения на обратные) они будут двигаться обратно по своим прежним траекториям.

ТНП дает теоретическую основу для исследования открытых систем, позволяет объяснить многие неравновесные явления в проводниках, например термоэлектрические явления, гальваномагнитные явления и др. Вывод законов термодинамики неравновесных процессов из законов механики (классической и квантовой) и получение выражений для кинетических коэффициентов через параметры, характеризующие строение вещества, входят в задачу неравновесной статистической термодинамики.

4.4. Синергетика

Название **синергетика** происходит от греческого слова *synergetikos* (совместимый, согласованно действующий) и служит для обозначения направления в науке, связанного с изучением закономерностей пространственно-временного упорядочения в разнообразных системах. Термин введен Г. Хакеном (Н. Haken) в начале 1970-х гг. и отражает тот факт, что процессы упорядочения в макроскопической системе возникают благодаря взаимодействию большого числа элементарных подсистем. Возникновение синергетики как самостоятельного направления связано с тем, что поведение разнообразных физических, химических, биологических и других систем описывается сходными математическими моделями и для таких систем характерны одни и те же явления *самоорганизации*. Это позволяет широко использовать результаты исследования одних объектов при анализе других.

Самоорганизация – самопроизвольное (не требующее внешних организующих воздействий) установление в неравновесных диссипативных средах устойчивых и регулярных структур. Первые исследования явления самоорганизации были проведены И.Р. Пригожиным и его коллегами в 1960-е гг.

²² Ларс Онсагер (1903-1976), американский физик-теоретик норвежского происхождения. Лауреат Нобелевской премии по химии (1968 г.) за вклад в теорию термодинамики необратимых процессов.

Наиболее известный и наглядный пример самоорганизации – возникновение конвективных решеток (сотовой структуры конвекции) с шестигранными ячейками, ячейками Бенара, при подогреве горизонтального слоя жидкости снизу. При подогреве снизу плоского слоя жидкости развивается т.н. конвективная неустойчивость, связанная с тем, что молекулярный теплоперенос не в состоянии обеспечить температурный баланс между нагретой нижней поверхностью и охлажденной верхней поверхностью слоя. Всплывающий вследствие действия архимедовой силы нагретый (более легкий) элемент жидкости вытесняет холодную жидкость, заставляя ее двигаться вниз. В результате в слое устанавливается стационарное вращение элементов жидкости, которое при визуализации выглядит как структура упорядоченных вложенных роликов или валов. Характерный масштаб зависит от толщины слоя и параметров жидкости в тех жидкостях, где существенна зависимость параметров от температуры, существующие на начальных этапах развития неустойчивости валы с различной ориентацией в результате эффекта взаимной синхронизации образуют связанное состояние – решетку с шестигранными ячейками. Возбуждения с любыми другими масштабами (отличными от наблюдаемого) подавляются в результате конкуренции.

Параметры установившихся макроскопических структур не зависят (в некоторых пределах) от изменения начальных условий. Они зависят лишь от свойств неравновесной диссипативной среды. В этом смысле такие диссипативные структуры естественно назвать автоструктурами, подобно, тому как установившиеся колебания в диссипативной системе с внешним источником энергии называют автоколебаниями. Другой пример – самопроизвольное образование спиральных волн в двумерном химическом реакторе, в котором протекают автокаталитические реакции типа реакции Белоусова-Жаботинского.

Теории самоорганизации представляют собой раздел нелинейной динамики неравновесных сред и основывается на сравнительно небольшом числе базовых моделей. Простейший (монотонный) процесс формообразования, установления статических структур описывается т.н. градиентными моделями.

4.5. Энтропия и информация²³

ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ – раздел математики, исследующий процессы хранения, преобразования и передачи информации. В основе его лежит определенный способ измерения количества информации. Возникшая из задач теории связи теория информации иногда рассматривается как математическая теория систем передачи информации. Опираясь на основополагающую работу К.

²³ ЛИТЕРАТУРА

Шеннон К. *Работы по теории информации и кибернетике*. М., 1963

Колмогоров А.Н. *Проблемы передачи информации*. М., 1965

Яглом А.М., Яглом И.М. *Вероятность и информация*. М., 1973

Галлагер Р. *Теория информации и надежная связь*. М., 1974

Чисар И., Кернер Я. *Теория информации: теоремы кодирования для дискретных систем без памяти*. М., 1985

Шеннона (1948), теория информации устанавливает основные границы возможностей систем передачи информации, задает исходные принципы их разработки и практического воплощения. Здесь рассматривается ядро теории информации – свойства информационных мер и их приложения к анализу систем передачи информации.

Основные свойства информации можно описать с помощью математической модели, отражающей многие характерные особенности информационной меры, как она обычно понимается на интуитивном уровне. Источник информации и канал связи, по которому передается информация, можно моделировать, используя вероятностные представления. Энтропия источника информации равна логарифму (эффективного) числа сообщений, которые он порождает. Это – мера сложности описания источника (или, как иногда говорят, мера неопределенности сообщения). Такое понимание энтропии тесно связано с понятием энтропии, используемым в термодинамике.

Трудность передачи информации зависит от числа возможных сообщений, которые должны быть распознаны получателем. Если это число невелико, то процесс передачи менее сложен, чем при большом числе возможных сообщений. Например, чтобы различить десять возможных сообщений, необходимо передать только одну десятичную цифру (0, 1, 2, ..., 9), а для различения 100 возможных сообщений понадобятся уже две десятичные цифры (00, 01, 02, ..., 99). Каждая дополнительная цифра позволяет увеличить число распознаваемых сообщений в 10 раз. Таким образом, количество информации, необходимой для того, чтобы мы могли различить N сообщений, растет, если говорить на математическом языке, как логарифм числа N , т.е. как $\log N$.

Физически передачу информации можно представить как индуцирование в приемном устройстве требуемого физического состояния. Отправитель намерен передать сообщение получателю. Суть передачи заключается в воспроизведении на выходе канала связи переданного сообщения. В момент передачи отправитель выбирает нужное сообщение из списка всех возможных сообщений. Получатель заранее не знает, какое из них будет выбрано. (Если бы он был об этом заранее информирован, то никакой необходимости посылать сообщение не было бы.) Канал связи вносит в процесс передачи информации случайный шум, который искажает сообщение и тем самым затрудняет его прочтение. В начале процесса связи получатель находится в полной неопределенности относительно того, какое сообщение выбрано из списка возможных. К концу связи получателю становится это известно, т.е. становится известно точное описание выбранного сообщения.

Способность канала связи передавать информацию характеризуется некоторым числом – пропускной способностью (емкостью), равной логарифму эффективного числа сообщений, различимых на его выходе. Процесс передачи информации можно считать надежным, если скорость передачи сообщений меньше пропускной способности канала. В противном случае надежная передача информации оказывается невозможной. Основным результатом теории информации состоит в утверждении: если энтропия источника меньше пропускной способности канала, то на его выходе исходное сообщение может быть

воспроизведено со сколь угодно малой ошибкой; если же энтропия источника превышает его пропускную способность, то ошибку сделать малой невозможно.

Трудность передачи сообщения не зависит от его содержания; передавать бессмысленные сообщения не менее трудно, чем осмысленные. Например, число 23 в одном контексте может быть ценой одного барреля нефти, а в другом – номером победителя заезда на скачках. Смысл сообщения зависит от контекста и семантики, а трудность его передачи определяется только перечнем возможных сообщений (и их вероятностей).

Любую систему передачи информации можно считать состоящей из трех частей: источника сообщений, канала связи и приемного устройства (рис. 1). Например, при разговоре по телефону источником является говорящий, сообщением – его речь. Каналом связи служат провода, передающие электрический сигнал от говорящего к слушателю – получателю сообщения.

Между отправителем сообщения и каналом связи могут находиться устройства (обозначенные на рис. 1 как кодирующие), преобразующие сообщение в форму, удобную для передачи по каналу связи. Декодирующее устройство, установленное на другом конце канала, восстанавливает принятое сообщение.



Рис. 2.6. Передача информации

По каналу связи может передаваться самая различная информация: текст, живая речь, музыка или изображения. Для каждого источника можно указать перечень сообщений, которые он может генерировать. Например, источник телеграфных или телексных сообщений передает только буквы и не содержит, скажем, нотных знаков. Если по каналу связи передается живая речь, то сигнал лишается полезного содержания при частоте выше 20 000 Гц, верхнего предела, воспринимаемого человеческим слухом. Этими фактами можно воспользоваться при проектировании входа канала связи.

5. Электродинамика и оптика

Со времен античности были известны способности тел к электризации и намагничиванию. Фалес Милетский (7-6 вв. до н.э.) даже считал, что магнит имеет душу. А электрические свойства янтаря (по-гречески, электрон) имеют развитие в современной электронике. Как стало известно в основном в XIX в., магнитные силы имеют не радиальный характер. Впрочем, как уже частично отмечалось, и электрические, и магнитные силы убывают обратно пропорционально квадрату расстояния. В силу ранее сказанного, здесь мы имеем проявления свойств евклидова пространства. Вопрос заключается только в том, *до каких малых расстояний закон обратных квадратов верен*. Впрочем, этот во-

прос выходит за рамки классической электродинамики, но не за рамки нашего курса, и мы вернемся к нему в дальнейшем. Электрические и магнитные, а также оптические явления исследовали многие известные ученые. Назовем лишь некоторые имена: Гильберт, Кулон, Эрстед, Ампер, Гюйгенс, Френель, Араго, Т. Юнг и ряд других. Вследствие краткости нашего изложения остановимся на поистине революционном вкладе, внесенном в науку об электричестве, магнетизме и свете гениальным английским ученым-самоучкой Майклом Фарадеем (1791-1867), который получил впоследствии теоретическое обобщение в трудах Джеймса Клерка Максвелла (1831-1879).

М. Фарадей был, по-видимому, первым, кто бросил вызов ньютоновской картине мира. Великий английский физик-экспериментатор ввел понятие поля (электрического, магнитного, электромагнитного) формально, как это делали в теории механики и до него. Он впервые описал силовые линии поля как нечто реально существующее и доказал правомерность такого подхода. Он открыл у переменных полей способность «проталкивать» друг друга через пустое пространство, порождая своего рода (бестелесную) волну. Он же высказал предположение, что свет может состоять из таких волн. В то время господствовала точка зрения (ньютоновский подход), что электромагнитные поля всего лишь удобные вспомогательные математические понятия для описания «настоящей» ньютоновской физической реальности - действия на расстоянии (дальнодействия) точечных частиц. После опытов Фарадея физика вновь вернулась к декартовым идеям близкого действия, от которых отошла в механике Ньютона.

Не кажется ли вам, что линия Декарт - Ньютон в истории науки напоминает линию Демокрит - Платон?

5.1. Уравнения Максвелла

Столкнувшись с обнаруженными Фарадеем экспериментальными фактами и с более ранними открытиями А. М. Ампера и других исследователей, великий шотландский физик и математик Джеймс Клерк Максвелл задумался над математической формой уравнений, описывающих электрические и магнитные поля, а также их взаимное превращение.

Установлению уравнений Максвелла предшествовал ряд открытий законов взаимодействий заряженных, намагниченных и токонесущих тел (в частности, законов Кулона, Био - Савара, Ампера). В 1831 М. Фарадей открыл закон электромагнитной индукции и примерно в то же время ввел понятие электрического и магнитного полей как самостоятельных физических субстанций. Опираясь на фарадеевское представление о поле и введя ток смещения, равнозначный по своему магнитному действию обычному электрическому току, Дж. К. Максвелл (J. C. Maxwell, 1864) сформулировал систему уравнений, названную впоследствии уравнениями Максвелла. М. у. функционально связывают электрические и магнитные поля с зарядами и токами и охватывают собой все известные закономерности макроэлектромагнетизма.

Впервые об уравнениях Максвелла было доложено на заседании Лондонского Королевского общества 27 окт. 1864. Первоначально Максвелл прибегал к

вспомогательным механическим моделям "эфира", но уже в "Трактате об электричестве и магнетизме" (1873) электромагнитное поле рассматривалось как самостоятельный, физический объект. Физическая основа уравнений Максвелла - принцип близкодействия, утверждающий, что передача электромагнитных возмущений от точки к точке происходит с конечной скоростью (в вакууме со скоростью света c). Он противопоставлялся ньютоновскому принципу дальнего действия, сводящемуся к мгновенной передаче воздействий на любое расстояние. Математическим аппаратом теории Максвелла послужил векторный анализ, представленный в инвариантной форме через кватернионы Гамильтона. Сам Максвелл считал, что его заслуга состоит лишь в математическом оформлении идей Фарадея.

Нельзя сказать, что Максвелл работал в теоретическом отношении на абсолютно пустом месте. Так в науке не бывает. Уже существовали уравнения аэро- и гидромеханики, теория потенциала в механике и, наконец, отдельные попытки математического описания опытов Фарадея, сделанные другими. Но полной картины электромагнитного поля не описал никто. Выводы Максвелла были результатом собственных теоретических постулатов – отчасти физических, отчасти математических, а где-то - даже эстетических. Максвеллу удалось вычислить скорость, с которой электромагнитное поле должно было распространяться в пространстве. И она в результате оказалась равной скорости света, незадолго до этого измеренной А. Физо (1819-1896).

Кроме того, электромагнитные волны интерферировали и обладали способностью поляризоваться, как и свет. Помимо объяснения свойств видимого света, для которого длины волн должны были лежать в диапазоне $4 - 7 \cdot 10^{-7}$ м, Максвелл предсказал существование электромагнитных волн других длин, порождаемых существованием электрических токов в проводниках. Существование предсказанных волн было установлено Г. Герцем в 1888 г.

Система уравнений Максвелла в системе СИ выглядит следующим образом.

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \bar{D} &= \rho, \\ \operatorname{div} \bar{B} &= 0. \end{aligned} \right| \quad (2.10)$$

Здесь \bar{E} - электрическое, а \bar{H} - магнитное поля, \bar{B} - магнитная индукция, \bar{j} - плотность электрического тока, \bar{D} - электрическая индукция, ρ - плотность электрического заряда, t - время.

Уравнения Максвелла в форме (2.10) не образуют полной замкнутой системы, позволяющей рассчитывать электромагнитные процессы при наличии

материальной среды. Их следует дополнить соотношениями, связывающими входящие в их состав векторы, которые не являются независимыми. Связь между векторами определяется свойствами среды и ее состоянием. Последние уравнения называются уравнениями состояния или материальными уравнениями.

Первое уравнение связывает изменения электрического поля с текущими значениями магнитного поля и электрического тока, тогда как второе, наоборот, описывает изменения магнитного поля в зависимости от величины электрического поля. Третье уравнение, грубо говоря, представляет собой закодированную форму закона обратных квадратов, показывающую, как электрическое поле (в данный момент времени) должно быть связано с распределением зарядов. Что же касается четвертого уравнения, то оно говорит то же самое о магнитном поле, с той лишь разницей, что «магнитные заряды» - отдельные «северные» и «южные» полюсы частиц - не существуют. На этом вопросе специально останавливается В.Л. Гинзбург [5], когда говорит о задачах, стоящих перед современной физикой. Он, однако, не исключает возможности открытия магнитного монополя в будущем.

Эти четыре уравнения утверждают: (1) электрическое поле происходит от электрических зарядов и выражается через закон Кулона, (2) не существует изолированных магнитных полюсов, а между полюсами магнита действуют кулоновские силы, (3) электрические поля могут производиться изменением магнитных полей по закону электромагнитной индукции Фарадея и (4) циркулирующие магнитные поля производятся изменением электрических полей и электрическими токами по закону Ампера, описывающему взаимодействие изменяющихся полей.

Манипуляция четырьмя уравнениями для электрических и магнитных полей привела Максвелла к волновым уравнениям для полей, решениями которых выступали распространяющиеся гармонические волны. Детальная математическая проработка сочеталась у него и с качественным пониманием: изменяющиеся магнитные поля порождают электрические и наоборот. Это предполагало возможность появления электромагнитного поля, в котором меняющееся электрическое поле вело к росту меняющегося магнитного поля и наоборот.

Электромагнитные волны не представляли собой какого-то физического смещения, которое распространялось через среду подобно звуку или волнам на воде; вместо этого имело место распространение колебаний электрического и магнитного полей. Непростым является в этой связи ответ на вопрос, что же колеблется в электромагнитных колебаниях? Понятно, что ответ вроде такого: колеблются векторы электрического и магнитного полей - вряд ли можно считать физическим. А есть ли другой?

Волновое уравнение Максвелла показывало, что скорость волн c определяется комбинацией констант в законах электро- и магнитостатики, говоря современным языком:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}},$$

где ϵ_0 — электрическая проницаемость свободного пространства, экспериментально найденное значение которой составляет $8,85 \cdot 10^{-12}$, а μ_0 — магнитная проницаемость свободного пространства, имеющая величину $1,26 \cdot 10^{-6}$. Значение этой и предыдущих величин даются в системе СИ.

Вычисленная отсюда скорость около $3 \cdot 10^8$ метров в секунду согласовалась с известной уже в то время скоростью света (опыты А.И. Физо). В своей лекции в Лондонском Королевском обществе «Динамическая теория электромагнитного поля», прочитанной в 1864 году, Максвелл заявил:

Мы имеем сильные основания для заключения о том, что свет как таковой, включая тепловое и любое другое излучение, является электромагнитным возмущением в форме волн, распространяющихся посредством электромагнитного поля в соответствии с электромагнитными законами.

Хотя понимание световых явлений претерпело со времени 1860-х годов глубокие перемены в результате открытия квантово-механической природы света, модель электромагнитных волн Максвелла для многих ситуаций сохраняет полную адекватность.

Квантово-механическая природа света особенно проявляется в фотоэффекте, который разделяется на внутренний и внешний и (теперь это можно уже сказать) электронный и ионный. Понимание природы фотоэффекта, в том числе и недавно открытого в Саратовском университете ионного фотоэффекта, существенно связано с развитием физики полупроводников, практические результаты которой явились, по словам Нобелевского лауреата Ж.И. Алферова, одним из трех крупнейших технических достижений 20-го столетия.

Уравнения Максвелла несколько напоминают уравнения Гамильтона тем, что определяют скорости изменения электрического и магнитного полей. В зависимости от их текущих значений в любой заданный момент времени. **Следовательно уравнения Максвелла являются по сути детерминистскими** — точно так же как и система уравнений в обычной гамильтоновой теории. Единственное, хотя и важное, различие в том, что уравнения Максвелла полевые, а не корпускулярные. Это означает, что для описания состояния такой системы необходимо бесконечно много параметров (векторы поля в каждой точке пространства) вместо всего лишь конечного числа параметров (вместо трех координат положения и трех компонентов импульса каждой частицы) в корпускулярной теории. **На основе теории Максвелла поля рассматриваются уже не как математические приделки к реальным частицам ньютоновой теории, но как самостоятельные существующие объекты.** Действительно, сам автор этой теории показал, что когда поля распространяются в виде нематериальных электромагнитных волн, они переносят с собой энергию. Этот факт был экспериментально подтвержден Герцем, сумевшим зарегистрировать электромагнитные волны, хотя это обстоятельство до сих пор представляется удивительным. Заряженные частицы в максвелловых уравнениях относятся, строго гово-

ря, к области квантовой электродинамики, хотя и там при обращении с ними возникают определенные трудности.

Максвелл установил, что радиоволны распространяются со скоростью света. Но относительно чего измерять эту скорость? Сам Максвелл предлагал это делать относительно эфира. Но от гипотезы эфира стали отказываться после опытов Майкельсона и Морли в 1887 г. В этих опытах было доказано, что скорость света одинакова вдоль и поперек направления вращения Земли. Это означало отсутствие увлечения эфира в результате вращения Земли. Эфир оказался неподходящей системой для отсчета скорости света, т.е. утратил свою роль абсолюта. *Из физики исчезло абсолютное. Физика становилась релятивистской.*

РАЗДЕЛ 3. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ФИЗИКА

6. Теория относительности²⁴

Когда жук ползет по кривому сучку, он не замечает, что сучок кривой. Я имел счастье заметить то, чего не замечает жук.

А. Эйнштейн. Из разговора с сыном, 1919

О кривизне пространства

Механика Ньютона была развита, как уже отмечалось, для евклидова пространства, в котором свет распространяется прямолинейно. И на этой основе вводится представление о прямой, как кратчайшем расстоянии между точками. Но свет не всегда распространяется по прямой. На границе сред он испытывает преломление, которое может к тому же управляться электрическим и магнитным полями. Благодаря трудам Эйнштейна астрономы организовали наблюдение и заметили, что световой луч искривляется и в поле тяготения.

Необходимо учитывать отклонения от евклидовой геометрии. Первым это сделал в самой геометрии Николай Иванович Лобачевский (1792-1856). В 1926 г. он построил геометрию, отличающуюся от евклидовой только постулатом о параллельных прямых. Он предположил, в отличие от Евклида, что через точку, расположенную в плоскости вне прямой, можно провести не одну, как у Евклида, а несколько прямых, не пересекающих данную. Необычный подход не был признан коллегами Лобачевского, поскольку сильно опережал время. Лишь

²⁴ ЛИТЕРАТУРА

Бор Н. Атомная физика и человеческое познание. М., 1961

Борн М. Физика в жизни моего поколения. М., 1963

Гернек Ф. Альберт Эйнштейн. Жизнь во имя истины, гуманизма и мира. М., 1966

Эйнштейн А. Собрание научных трудов. М., 1967

Борн М. Эйнштейновская теория относительности. М., 1972

в начале XX в. было показано, что он удовлетворяет преобразованиям Лоренца и действует при скоростях близких к скорости света. Геометрия Лобачевского описывает ситуацию на поверхностях отрицательной кривизны, например, на псевдосфере. Последняя важна для астрономии и астрофизики. В современной физике соответствующие процессы описываются в общей теории относительности. Мысли подобные тем, что высказал Н.И. Лобачевский, появились несколько лет спустя у Больяи (в 1832 г.). К неевклидовой геометрии пришел и Гаусс (1777-1855), но не решался публиковать свои исследования. Риман (1826 - 1866) создал другой тип неевклидовой геометрии, справедливый на сфере. В зависимости от того, какой тип поверхностей мы берем за основу, может измениться и число π . В конце 60-х – начале 70-х гг. XX столетия астрономы Пулковской обсерватории имели проект для связи с внеземными цивилизациями. Он заключался в сканировании мирового пространства двумя лучами мощных лазеров, частоты которых отличались в «пи» раз. Таким образом, «визитная карточка» земной цивилизации должна была содержать в себе это число. Поскольку 5-й постулат Евклида опирается на плоскость, то именно плоскость в евклидовой геометрии является поверхностью с нулевой кривизной. Поэтому можно сказать, обобщая на трехмерный случай, что **механика Ньютона была создана для пространства с нулевой кривизной**. И, если современная физика работает с пространствами ненулевой кривизны, а это происходит как в микро-, так и в мегамире, появляется и необходимость в новой механике. По-видимому, раньше других это понял А. Эйнштейн.

Относительность в физике

Теории относительности образуют существенную часть теоретического базиса современной физики. Существуют две основные теории: частная (специальная) и общая. Обе были созданы А. Эйнштейном, частная – в 1905, общая – в 1915 гг.

В современной физике частная теория относительности (ТО) вместе с квантовой механикой играет такую же роль, какую раньше играла механика Ньютона. Ньютонская механика хорошо описывала поведение объектов средних размеров, движущихся со скоростями, намного меньшими скорости света, но не могла описать движение очень малых объектов, таких, как атомы и входящие в состав атомов частицы или же частицы, из которых состоят космические лучи. Эти несоответствия стали проявляться в начале 20 в., и средства их преодоления оказались поистине революционными: квантовая механика, рассматривающая поведение очень малых частиц, отвергла ньютоновский детерминизм, а частная теория относительности, применимая к быстро движущимся телам, отвергла ньютоновское представление об абсолютном времени.

Ньютонская механика по-прежнему применяется в практических расчетах и в тех разделах астрономии, где рассматриваемые объекты – планеты, самолеты, автомобили – достаточно велики и движутся со скоростью, намного меньшей скорости света. Но как частная ТО, так и квантовая механика очень важны для теоретического мышления физика, тем более что их правильность

подтверждается многочисленными экспериментами. На *этих теориях основывается почти вся современная ядерная физика.*

В то же время общая теория относительности (ОТО), несмотря на ее огромное теоретическое значение, имеет пока довольно узкую область практического применения. Это в основном теория тяготения и инерции, заменяющая ньютоновскую теорию тяготения в точных расчетах очень больших систем (планетарного масштаба и более). Она позволяет в рамках физики и астрономии рассматривать структуру Вселенной как целого. ОТО включает в себя частную ТО как частный случай и потому пригодна для описания всех явлений, которые правильно описываются как теорией Ньютона, так и частной ТО. При этом все практические отличия ОТО связаны только с гравитационным полем.

Истоки возникновения теории относительности коренятся в противоречии между ньютоновской механикой и электромагнитной теорией Дж. Максвелла, выявившемся в конце 19 в. Созданию частной ТО, разрешающей это противоречие, мы обязаны не только Эйнштейну, но также Г. Лоренцу и А. Пуанкаре. Именно Лоренц и Пуанкаре создали математический аппарат частной ТО. Благодаря Эйнштейну, глубоко постигшему ее физический смысл, частная ТО получила быстрое и всеобщее признание. Среди более поздних исследователей, внесших существенный вклад в развитие частной ТО, следует упомянуть Германа Минковского (1864–1909). Минковский развил концепцию четырехмерного пространственно-временного континуума, в котором временная координата рассматривается как равноправная с пространственными координатами; он предложил также удобную геометрическую интерпретацию уравнений частной ТО.

Заслуга создания ОТО принадлежит исключительно Эйнштейну. Он ввел в физику новый математический аппарат – тензорное исчисление, разработанное Г. Риччи и Т. Леви-Чивитой. В математическом отношении теория оказалась весьма сложной, практических выводов из нее было мало, а проверить их путем наблюдений было трудно. В отличие от частной ТО, которая теперь почти полностью исследована, ОТО еще далека от этого. ОТО стала популярной не только среди физиков, но и в широких слоях образованных людей, когда наблюдения за затмением Солнца в 1919 подтвердили ее предсказание, согласно которому свет от далеких звезд, проходящий вблизи Солнца, должен испытывать отклонение.

На ОТО базировались многочисленные попытки создания единых теорий поля, охватывавших не только гравитационные, но также электромагнитные и прочие физические явления. Такие попытки, однако, имели мало успеха, а после смерти Эйнштейна, который и сам предпринял ряд таких попыток, активность в этом направлении снизилась. Физики, уверенные в возможности создания единых теорий, объясняющих все физические явления, полагают, что более перспективен синтез ОТО с квантовой теорией. Релятивистская квантовая теория, в некоторой мере объединившая частную ТО и квантовую теорию, добилась заметного успеха в подтверждении теории электрона П. Дирака (1928). И хотя разработка *общей релятивистской квантовой теории* еще далека от за-

вершения, есть основание надеяться, что именно с ее развитием будут связаны дальнейшие успехи теоретической физики в целом.

6.1. А. Эйнштейн и международный год физики

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГОД ЭЙНШТЕЙНА. 100 лет назад в немецком физическом журнале «Annalen der Physik» были опубликованы 4 статьи дотоле неизвестного ученого 26-летнего Альберта Эйнштейна. В ту пору он работал техническим испытателем 3 класса в бернском патентном ведомстве (Швейцария). **В первой своей статье** он объяснил (квантовую) природу света и внешнего фотоэффекта, вторая доказывала существование атомов, а третья «К электродинамике движущихся сред» была посвящена специальной теории относительности (название пришло позднее) и перевернула существовавшие со времен Ньютона взгляды на пространство и время. Если Ньютон считал время текущим равномерно от одного мгновения к другому, то Лейбниц рассматривал время как язык, который позволяет связать между собой разные события. В мире без событий, т.е. изменений не будет и времени. Эйнштейн приблизился к трактовке Лейбница, но не заимствовал ее полностью. В связи со столь значительным вкладом одного человека в историю науки Организация объединенных наций объявила 2005 год годом Эйнштейна и физики вообще.

Хронологически первыми были исследования Эйнштейна по молекулярной физике (начало им было положено в 1902 г.). Они посвящены проблеме статистического описания движения атомов и молекул и взаимосвязи движения и теплоты. В этих работах Эйнштейн пришел к выводам, существенно расширяющим результаты, которые были получены австрийским физиком Л. Больцманом и американским физиком Дж. Гиббсом. Они и послужили материалом для докторской степени, которую Э. получил в 1905 г., опубликовав соответствующую работу в журнале «Annalen der Physik» («Новое определение размеров молекул»). В центре внимания Эйнштейна в его исследованиях по теории теплоты находилось броуновское движение. В статье 1905 в том же журнале он придал законченную математическую форму статистическому объяснению этого явления, представленному ранее польским физиком М. Смолуховским. Закон броуновского движения Эйнштейна был полностью подтвержден в 1908 опытами французского физика Ж. Перрена. Работы по молекулярной физике доказывали правильность представлений о том, что теплота есть форма энергии неупорядоченного движения молекул. Одновременно они **подтверждали атомистическую гипотезу**, а предложенный Эйнштейном метод определения размеров молекул и его формула для броуновского движения позволяли определить число молекул. **Вторая статья** в «Annalen der Physik» («О молекулярно-кинетической теории тепла, вызывающего движение частиц, суспендированных в покоящейся жидкости»).

Если работы по теории броуновского движения продолжили и логически завершили предшествовавшие работы в области молекулярной физики, то работы по теории света, тоже базировавшиеся на сделанном ранее открытии, носили революционный характер. В своем учении Эйнштейн опирался на гипоте-

зу, выдвинутую в 1900 М. Планком, о квантовании энергии материального осциллятора. Но Эйнштейн пошел дальше и постулировал квантование самого светового излучения, рассматривая последнее как поток квантов света, или фотонов (фотонная теория света). Это позволяло простым способом объяснить фотоэлектрический эффект – выбивание электронов из металла световыми лучами, явление, обнаруженное в 1886 Г. Герцем и не укладывавшееся в рамки волновой теории света. Девять лет спустя предложенная Эйнштейном интерпретация была подтверждена исследованиями американского физика Милликена, а в 1923 *реальность фотонов* стала очевидной с открытием эффекта Комптона (рассеяние рентгеновских лучей на электронах, слабо связанных с атомами). В чисто научном отношении гипотеза световых квантов составила целую эпоху. *Это была третья статья Э.* В 1905 в упомянутом журнале. Без нее не могли бы появиться знаменитая модель атома Н. Бора (1913) и гениальная гипотеза «волн материи» Луи де Бройля (начало 1920-х годов).

В том же 1905 была опубликована *4-я работа Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» (Zur Elektrodynamik der bewegter Körper)*. В ней излагалась специальная теория относительности, которая обобщала ньютоновские законы движения и переходила в них при малых скоростях движения ($v \ll c$). В основе теории лежали два постулата: *специальный принцип относительности*, являющийся обобщением механического принципа относительности Галилея на любые физические явления (в любых инерциальных, т.е. движущихся без ускорения, системах все физические процессы – механические, электрические, тепловые и т.д. – протекают одинаково), и принцип постоянства скорости света в вакууме (скорость света в вакууме не зависит от движения источника или наблюдателя, т.е. одинакова во всех инерциальных системах и равна $3 \cdot 10^{10}$ см/с). Это привело к ломке многих основополагающих понятий (абсолютность пространства и времени), установлению новых пространственно-временных представлений (относительность длины, времени, одновременности событий). Минковский, создавший математическую основу теории относительности, высказал мысль, что пространство и время должны рассматриваться как единое целое (обобщение евклидова пространства, в котором роль четвертого измерения играет время). Разным эквивалентным системам отсчета соответствуют разные «срезы» пространства-времени.

Исходя из специальной теории относительности, Эйнштейн в том же *1905 открыл закон взаимосвязи массы и энергии. Его математическим выражением является знаменитая формула $E = mc^2$* . Из нее следует, что любой перенос энергии связан с переносом массы. Эта формула трактуется так же, как выражение, описывающее «превращение» массы в энергию. Именно на этом представлении основано объяснение т.н. «дефекта массы». В механических, тепловых и электрических процессах он слишком мал и потому остается незамеченным. На микроуровне он проявляется в том, что сумма масс составных частей атомного ядра может оказаться больше массы ядра в целом. Недостаток массы превращается в энергию связи, необходимую для удержания составных частей. *Атомная энергия есть не что иное, как превратившаяся в энергию масса*. Принцип эквивалентности массы и энергии позволил упростить все за-

коны сохранения. Оба закона – сохранения массы и сохранения энергии – до этого существовавшие отдельно, превратились в один общий закон: для замкнутой материальной системы сумма массы и энергии остается неизменной при любых процессах. Закон Эйнштейна лежит в основе всей ядерной физики.

6.2. Частная теория относительности

Основные представления ньютоновской теории заключаются в следующем. *Пространство и время рассматриваются как абсолютные и первичные. Абсолютное пространство однородно и изотропно.* Это означает, что все его точки, как и все направления в нем, равноправны. Параллельные линии не сходятся и не расходятся, а это означает, что рассматривается, как уже отмечалось, *евклидово пространство*, свойства которого полностью описываются евклидовой геометрией.

Распространение света. Частная ТО возникла в результате противоречия между ньютоновской механикой и максвелловской электромагнитной теорией света. Согласно теории Максвелла, свет представляет собой электромагнитные колебания, которые в виде волны распространяются с определенной скоростью. Скорость света в материальных средах меньше, чем в вакууме.

Во второй половине 19 в. было принято искать механические модели для всех физических явлений. Так, световые колебания рассматривались как колебания некоторой физической среды – «светоносного эфира». Предполагалось, что эфир неподвижен в абсолютном пространстве ньютоновской механики. Поэтому в принципе представлялось возможным в опытах со светом выявить движение Земли относительно эфира, т.е. ее абсолютное движение. При этом, если Земля движется в эфире со скоростью v , а свет – со скоростью c , то свет, движущийся в том же направлении, что и Земля, должен, согласно механике Ньютона, перемещаться относительно Земли со скоростью $(c - v)$, а свет, движущийся в противоположном направлении, должен иметь относительно Земли скорость $(c + v)$.

Первая попытка измерения скорости движения Земли относительно светоносного эфира была сделана А. Майкельсоном в 1881. Этот «эфирный» эксперимент он впоследствии с большей точностью повторил вместе с Э. Морли, а потому теперь эти эксперименты называются опытами Майкельсона – Морли. Опыт основан на сравнении скорости света в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Подробности опыта мы рассматривать не будем, но его результат имеет огромное значение. Он показал, что скорость Земли относительно эфира в любой момент не превышает 1 км/с. Однако, как известно, скорость Земли на орбите составляет около 30 км/с, а поскольку направление ее движения изменяется на противоположное каждые 6 мес., то ее скорость в любом заданном направлении должна изменяться на протяжении полугода примерно на 60 км/с. Поэтому был сделан вывод, что скорость света относительно прибора практически не зависит от движения прибора относительно эфира – результат, который совершенно не согласуется с механикой Ньютона. Затем была выпол-

нена серия еще более точных опытов, и результат неизменно оставался отрицательным.

Это неожиданное открытие объяснялось по-разному. Предполагалось, что Земля должна каким-то образом увлекать за собой окружающий эфир. Однако гипотеза «увлекаемого эфира» противоречила некоторым астрономическим наблюдениям (таким, как звездная абберация). Дж. Фитцджеральд (1851–1901) и независимо от него Г. Лоренц высказали предположение, что движение прибора (или любого другого предмета) в эфире должно вызывать сокращение его размеров на величину, необходимую для того, чтобы скомпенсировать ожидаемый эффект. Однако эта гипотеза о сокращении размеров, изначально базировавшаяся на ньютоновских представлениях, оказалась в противоречии с модифицированным опытом Майкельсона – Морли, выполненным в 1932 Р. Кеннеди и Э. Торндайком. В. Ритц выступил с утверждением, что скорость света в вакууме всегда должна быть равна c не относительно эфира, а относительно источника света, но это противоречило опытам Р. Томашека (выполненным с использованием солнечного света и света звезд в 1924 в духе опытов Майкельсона – Морли), а также астрономическим наблюдениям орбит двойных звезд.

Все разнообразие этих наблюдений можно свести к одному положению, с которым не согласуется ни одна из упомянутых гипотез: наблюдаемая скорость света, испускаемого движущимся в вакууме источником, не зависит от движения наблюдателя. Это положение явно противоречит ньютоновской механике.

Пространственно-временные диаграммы в частной ТО.

Противоречие было разрешено частной ТО, основные положения которой следуют из эмпирического заключения об инвариантности скорости света, принципа относительности Галилея и модифицированного второго закона Ньютона. Должны быть также модифицированы и уравнения преобразований Галилея.

Чтобы согласовать утверждение об инвариантности скорости света с классическими преобразованиями Галилея, последние нужно изменить так, чтобы скорость света во всех инерциальных системах отсчета была одной и той же. Пространственно-временные диаграммы, представленные на рис.8, показывают, что из этого следует. На них мы видим мировые линии двух наблюдателей Р и Q, с каждым из которых связана инерциальная система отсчета. На верхних диаграммах покоится Р, а Q движется вправо со скоростью v . В момент, когда Q проходит мимо Р, там вспыхивает лампа и световые лучи L и R расходятся влево и вправо со скоростью c . Поскольку скорости в обоих направлениях равны, лучи наклонены по отношению к вертикали одинаково. На нижних диаграммах представлен случай, когда путем надлежащего преобразования был осуществлен переход к другой инерциальной системе отсчета, где Q покоится, а Р движется влево со скоростью v . Левая диаграмма соответствует механике Ньютона: лампа наблюдателя Р теперь движется вместе с ним со скоростью v и, следовательно, световой луч L, распространяющийся влево, имеет

скорость $(c + v)$, тогда как луч R , распространяющийся вправо, имеет скорость $(c - v)$. Это различие представлено разным наклоном лучей.

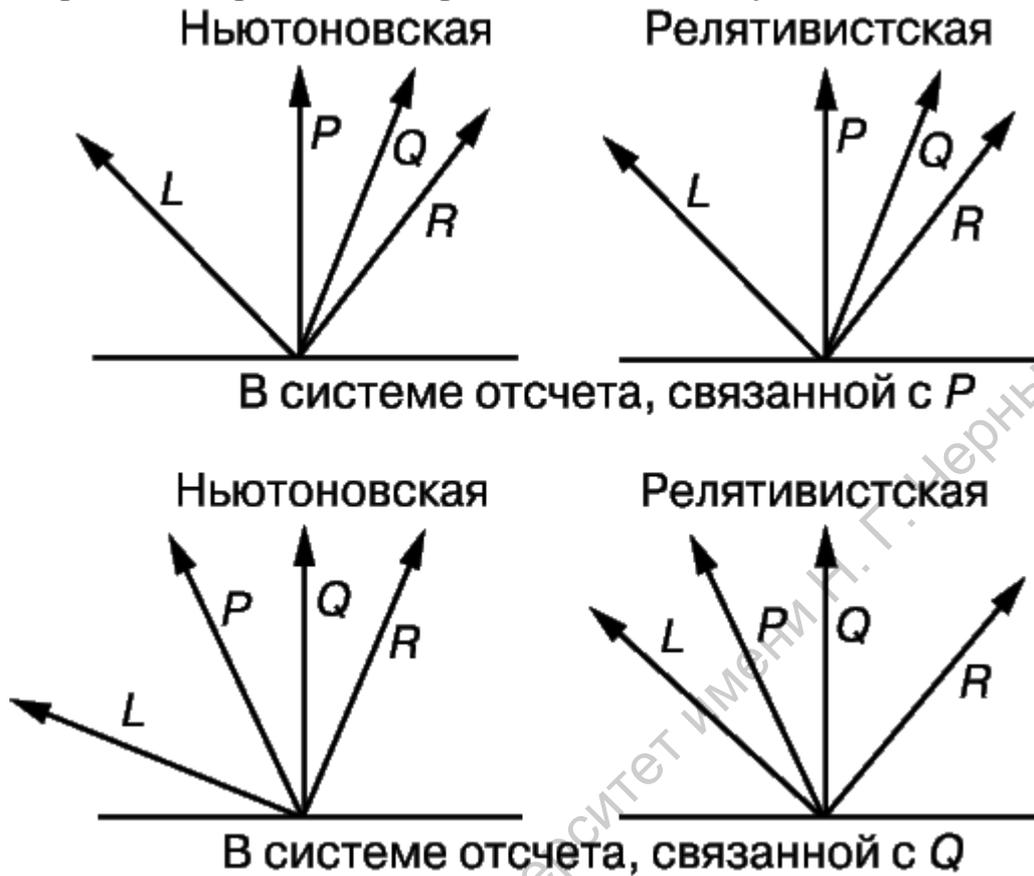


Рис. 3.1. Принцип инвариантности скорости света представляет собой основу теории относительности, тогда как в ньютоновской теории скорость света зависит от скорости наблюдателя. В момент прохождения наблюдателя Q мимо наблюдателя P последний включает лампу. Световые лучи L и R расходятся влево и вправо. Как ньютоновская, так и релятивистская диаграммы показывают, что в системе отсчета, связанной с P , L и R расходятся с равными скоростями. В системе же отсчета, связанной с Q , скорость луча L на ньютоновской диаграмме больше, чем луча R , тогда как на релятивистской диаграмме лучи L и R распространяются с одинаковыми скоростями. Для согласования ньютоновских и релятивистских результатов потребовались преобразования Лоренца. Здесь изображены мировые линии, а не геометрические траектории.

Однако приведенное рассуждение противоречит требованию постоянства скорости света c в любой инерциальной системе отсчета. Представленная же справа диаграмма – релятивистская – соответствует случаю, когда это требование выполняется. В новой системе отсчета скорости обоих световых лучей равны c . Поэтому пространство-время должно быть подвергнуто таким преобразованиям, чтобы скорость света осталась неизменной. Этому условию удовлетворяют преобразования Лоренца.



Альберт Эйнштейн

Концепция пространства-времени.

То, каким образом пространственные координаты x , y , z и время t входят в уравнения преобразований Лоренца, навело Г. Минковского на мысль, что пространство и время следует рассматривать не так, как в механике Ньютона с ее трехмерным евклидовым пространством и совершенно обособленной временной координатой, а всегда вместе, в виде некой четырехмерной комбинации. Новая концепция оказалась очень плодотворной и благодаря наглядной геометрической интерпретации во многом способствовала развитию теории. (Такое пространство-время часто называют пространством Минковского.) Вместо того чтобы рассматривать физическую систему как совокупность частиц в пространстве, ее следует представить как совокупность мировых линий частиц в пространстве-времени, которая описывает полную историю системы. Как и евклидово пространство в механике Ньютона, пространство-время Минковского однородно, изотропно и обладает дополнительными свойствами симметрии, вытекающими из преобразований Лоренца.

Главные следствия частной ТО.

Многие результаты частной ТО вытекают из преобразований Лоренца. Ниже приводятся лишь сами результаты, а не их вывод.

Относительность времени (относительность одновременности). В теории относительности не существует абсолютного ньютоновского времени. В преобразованиях Галилея время остается без изменений. Из формул преобразований Лоренца следует, однако, что время в разных системах отсчета течет по-разному.

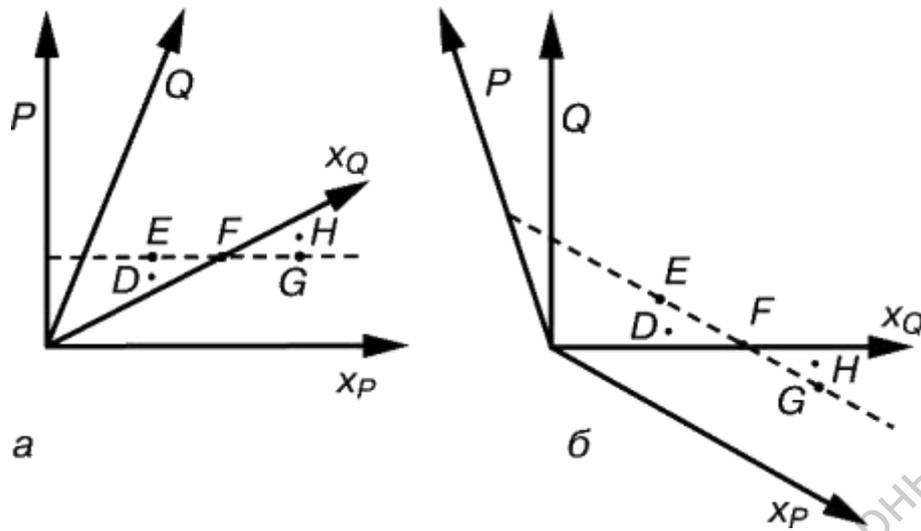


Рис. 3.2. Относительность одновременности рушит представления о времени как не зависящем от движения в какой-либо системе отсчета. События, одновременные в одной системе отсчета, не являются таковыми в другой, и наоборот. В системе отсчета, связанной с P (в которой Q равномерно движется вправо от P), событие D происходит раньше одновременных событий E, F, G , а событие H – позже них. В системе отсчета, связанной с Q (в которой P движется равномерно влево от Q), события E, F, G более не являются одновременными; событие D происходит после F , а событие H – раньше F .

На рис. 3.2 представлены две пространственно-временные диаграммы. На обеих отображены одни и те же события, но одна соответствует системе отсчета, связанной с P , а другая – системе, связанной с Q и движущейся относительно P . Таким образом, они согласуются с релятивистскими диаграммами рис. 4 (справа), но здесь вместо одной оси x имеются две – для P и Q . Оси и мировые точки D, E, F, G и H изображены так, что их положения на обеих диаграммах согласуются с преобразованиями Лоренца. На рис. 5,а, в системе, где P покоится, мировые точки E, F и G лежат на горизонтальной линии, а это означает, что все три представленных события происходят в одно время в разных местах (одно и то же t , но разные x). Событие D наступает раньше других, а событие H – позже. На рис. 5,б, в системе, где Q покоится, мировые точки, соответствовавшие в предыдущем случае одновременным событиям (при одном и том же значении t), теперь соответствуют событиям, происходящим при разных значениях t . Рассмотрим диаграмму. События E, F и G более не являются одновременными: сначала произойдет G , затем F и, наконец, E . Событие D по-прежнему произойдет раньше E , но позже F , хотя в предыдущем случае оно, как и следует из преобразований Лоренца, происходило раньше F . Аналогично ведут себя события H и G . Таким образом, относительна не только одновременность событий, но и порядок их наступления. Рассмотрим события D и E , а также события G и H . Каждая пара событий имеет на левой диаграмме одинаковую абсциссу x , указывающую на то, что пара событий происходила в одном и том же месте. Все эти события теперь будут происходить в разных местах (рис. 5,б). Конечно, то же самое происходит и в ньютоновской теории. Упорядоченность событий от прошлого к будущему нарушается в ТО далеко не всегда. Некоторые события имеют вполне определенный порядок, вне зависимости от используемой

для их описания системы отсчета. Например, опыт показывает, что события на мировой линии некоторого наблюдателя должны происходить в определенном порядке, и два наблюдателя всегда согласятся по поводу порядка событий, при которых они оба присутствовали.

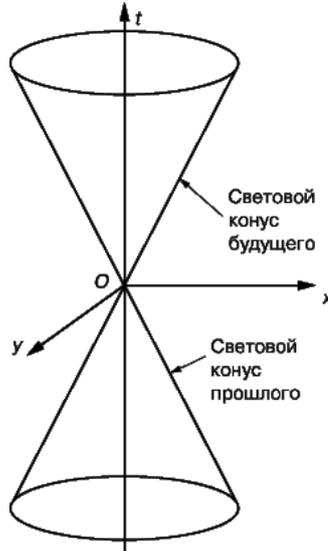


Рис. 3.3. Световой конус на пространственно-временной диаграмме иллюстрирует некоторые следствия теории относительности для понятия времени. В ньютоновской теории время абсолютно. В теории относительности время между событиями и их последовательность зависят от системы отсчета. Световой конус будущего, исходящий из точки O вверх (при фиксированном t – сфера, соответствующая распространению света во всех направлениях на расстояние ct , начавшемуся в момент $t = 0$, из точки O), представляет события, которые должны случиться после события O . Световой конус прошлого представляет события, которые должны произойти ранее O : он состоит из точек, откуда свет достигнет O в момент $t = 0$. Все точки вне двойного конуса представляют события, которые в зависимости от системы отсчета могут случиться как раньше, так и позже события O .

На рис. 10 представлена пространственно-временная диаграмма истории световой вспышки, произошедшей в мировой точке O в момент $t = 0$. Спустя время t свет распространится на расстояние ct во всех направлениях и будет находиться на поверхности сферы радиусом ct . История этой сферы на диаграмме имеет вид конуса с вершиной в точке O . Этот конус (верхний на рис. 6) называется конусом будущего. События, свет от которых достигнет точки O в момент $t = 0$, образуют конус прошлого (нижний конус на рис. 6). Он выглядит точно так же, как конус будущего, но обращен назад. Вместе конусы прошлого и будущего образуют двойной конус с вершиной в пространственно-временной точке O , называемый «световым конусом».

Любое событие, располагающееся внутри конуса будущего, всегда (во всех системах отсчета) происходит после события O . Поэтому событие O может, в принципе, быть его причиной. Любое событие, лежащее внутри конуса прошлого, всегда происходит до события O . Поэтому оно может, в принципе, быть причиной O . Любое событие, лежащее вне светового конуса, может происходить как до, так и после O , в зависимости от системы отсчета. Поэтому между ним и событием O не может быть причинно-следственной связи. Сам световой конус не меняет формы при преобразованиях Лоренца, т.е. выглядит

одинаково во всех системах отсчета, и это согласуется с опытным фактом, на котором основывается частная ТО, а именно, что скорость света в вакууме не зависит ни от движения источника, ни от движения наблюдателя.

Сокращение Фитцджеральда – Лоренца (лоренцево сокращение). Из преобразований Лоренца сразу же следует, что измеренная длина движущегося объекта отличается от его длины, измеренной, когда он покоится

Рассмотрим стержень, который покоится в некоторой системе отсчета, и пусть его длина, измеренная в этой системе, равна L . Если положение концов стержня измерить одновременно в системе отсчета, которая движется относительно первой со скоростью v (в направлении длины стержня), то выяснится, что расстояние между концами стержня равно уже не L , а L/γ , где

$\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$, а c – скорость света. Таким образом, вследствие движения измеренная длина стержня сокращается в γ раз. Величина γ очень близка к единице, если скорость стержня мала по сравнению со скоростью света, и резко возрастает, когда его скорость приближается к c . Этим безо всяких дополнительных гипотез о поведении объектов относительно абсолютного пространства или о свойствах эфира объясняется отрицательный результат опыта Майкельсона – Морли. Лоренцево сокращение объясняется только относительным движением объектов. То же относится и ко всем другим вопросам, рассматриваемым в рамках частной ТО.

Замедление времени. Так называемое замедление времени или замедление хода движущихся часов, – явление, аналогичное рассмотренному выше сокращению длины. Оно состоит в изменении в γ раз длительности измеряемых временных промежутков. Здесь есть два важных следствия, одно из которых имеет непосредственное приложение в физике.

Рассмотрим, как и прежде, двух наблюдателей P и Q и два события D и E , например, в истории Q . Предположим, что в системе отсчета, где Q покоится (система Q), событие E происходит t секундами позже события D . Тогда в системе, где покоится P (система P), эти два события происходят в точках, разделенных расстоянием $v\gamma t$, а E происходит после D не через t , а через γt секунд.

Поскольку всегда $\gamma = 1/\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} > 1$, время между двумя событиями, измеренное

в системе P , где события происходят в разных точках, всегда больше, чем в системе Q , где они происходят в одной точке. Скорость наблюдателя Q в системе P есть просто относительная скорость двух систем отсчета.

Релятивистское замедление времени было экспериментально подтверждено многими опытами, из которых наиболее наглядным является следующий. В космических лучах присутствуют мюоны – нестабильные элементарные частицы, которые можно также получить на ускорителе. Как показывают лабораторные эксперименты, спустя время $t = 2 \cdot 10^{-6}$ с после рождения эти частицы распадаются на электроны и нейтрино. Рождаются же мюоны в атмосфере из других космических частиц на высоте около 10 км и движутся к земле со ско-

ростью $v = 0,998c$, т.е. почти со скоростью света. Однако движущаяся с такой скоростью частица, согласно ньютоновской механике, может до своего распада пройти расстояние vt , равное всего 600 м. Следовательно, мюоны никак не могли бы достичь земной поверхности, если принять во внимание высоту, на которой эти частицы рождаются. Тем не менее, они обнаруживаются на уровне моря. Объясняется это противоречие тем, что время жизни определялось в системе отсчета, где мюон покоится. В действительности же мюон движется относительно Земли с большой скоростью и вследствие релятивистского замедления времени интервал между событиями его рождения и распада различен для системы отсчета, в которой частица покоится, и системы, в которой она движется с большой скоростью. При переходе от системы покоя мюона к системе, в которой он движется со скоростью порядка $0,998c$, время жизни мюонов возрастает от t до γt , т.е. примерно в 16 раз. Измеренное лабораторными методами расстояние, проходимое мюонами от рождения до распада, составит $v\gamma t = 16 \cdot 600$ м, т.е. около 10 км. Этим и объясняется возможность наблюдения мюонов на уровне моря.

Парадокс часов (или близнецов).

В начальный период существования частной ТО большое внимание уделялось одному из ее следствий, так называемому парадоксу часов, или парадоксу близнецов, – пожалуй, наиболее поразительному из всех следствий этой теории. Кажущийся парадокс неразрешим, если оставаться на позициях механики Ньютона.

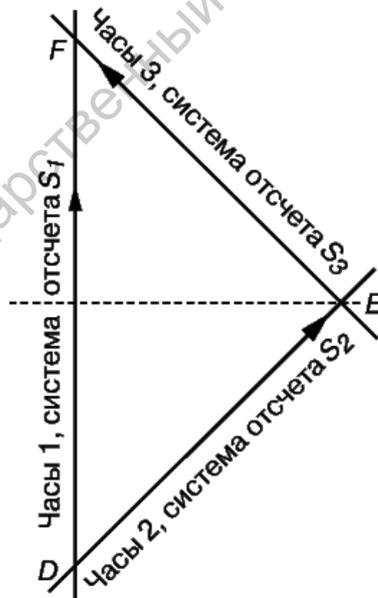


Рис. 3.4. Парадокс часов, или парадокс близнецов иллюстрируется пространственно-временной диаграммой. Мимо покоящихся в системе S_1 часов 1 равномерно движутся вправо часы 2 (которые покоятся относительно системы S_2) и встречаются с часами 1 (событие D). Событие E заключается в том, что часы 3, движущиеся влево (и покоящиеся в S_3), проходят мимо часов 2. Когда часы 3 проходят мимо часов 1 (событие F), промежуток времени, заре-

гистрированный часами 1, оказывается больше суммы промежутков, зарегистрированных часами 2 между событиями D и E и часами 3 между событиями E и F .

Рассматриваемое явление существенным образом связано с эффектом замедления времени, которое здесь приходится учитывать дважды. Пусть имеются часы 1, 2 и 3, расположенные следующим образом. Часы 1 находятся в покое относительно инерциальной системы отсчета $S1$. Со скоростью v относительно этой системы вправо равномерно движутся часы 2, с которыми связана другая инерциальная система отсчета $S2$. Часы 3 движутся равномерно влево со скоростью v относительно системы отсчета $S1$. С этими часами связана третья инерциальная система отсчета $S3$. Пространственно-временная диаграмма для данного случая представлена на рис. 11. События D , E и F таковы: D – часы 2 проходят мимо часов 1; E – часы 2 и 3 проходят друг мимо друга; F – часы 3 проходят мимо часов 1. Если время между D и E , измеренное часами 2 в системе отсчета $S2$, где они покоятся, равно t , то вследствие замедления времени время между этими событиями, измеренное в $S1$, будет равно γt . Аналогично время между E и F , измеренное часами 3 в системе отсчета $S3$, где они покоятся, тоже равно t , а время между этими событиями, измеренное в $S1$, опять-таки должно быть равно γt . Таким образом, полное время между событиями D и F , измеренное часами 1 в системе $S1$, равно $2\gamma t$, а измеренное часами 2 в системе $S2$ и часами 3 в системе $S3$ – всего лишь $2t$.

Чтобы лучше разобраться во всем этом, предположим, что часы 2 синхронизированы с часами 1 и их показания совпадают в момент встречи (событие D), а часы 3 точно так же синхронизированы с часами 2 для момента их встречи (событие E). Тогда часы 3 не покажут то же время, что и часы 1, в момент их встречи (событие F), а будут отставать на время $2\gamma t - 2t$ или $2(\gamma - 1)t$. Разница в показаниях часов 1 и 3 в момент события F может быть весьма значительной, если точки встречи достаточно удалены друг от друга.

Этот любопытный результат может показаться довольно абстрактным, пока в рассмотрение не входит человеческий фактор. Заменим часы 2 и 3 одними часами, помещенными на борту космического корабля, уносящего в звездные дали одного из близнецов, брат которого вместе с часами 1 остается на Земле. Пренебрежем на время орбитальным движением Земли и ускорениями космического корабля в моменты, когда он покидает Землю (D), поворачивает назад (E) и возвращается (F). Если, к примеру, корабль путешествует к ближайшей известной звезде Альфа Центавра, расстояние до которой составляет 4,2 светового года, а скорость корабля равна 99% скорости света, то от старта корабля до его возвращения на Землю пройдет около 8,5 года. Однако на самом корабле пройдет лишь 14,5 месяца. И если к началу путешествия близнецам было по 10 лет, то к его завершению землянину будет 18 с половиной, а его брату астронавту – чуть больше 11. При более длительных путешествиях разница возрастет. Этот вывод существенно не изменится, если учесть, что при взлете, повороте и посадке корабль должен разгоняться и тормозить постепенно, а не мгновенно, как в только что разобранным случае. Дело не в ускорениях,

а в различии мировых линий близнецов: кривизна одной из них значительно больше, чем другой.

Казалось бы, приведенные рассуждения можно симметрично повторить, предполагая, что астронавт находится в покоящейся системе, а землянин – в движущейся. Тогда оказалось бы, что больше постареет астронавт – *в этом и заключается парадокс*. Однако это не так. Землянин (с часами 1) все время остается в покое в инерциальной системе отсчета S_1 , а астронавт (с часами 2 и 3) в процессе путешествия переходит от одной инерциальной системы к другой. Таким образом, близнецы находятся *совсем не в симметричных положениях*²⁵. Детальный анализ показывает, что движение землянина, с точки зрения астронавта, отличается от движения астронавта с точки зрения землянина. А поэтому и не получается, что при повторной встрече астронавт станет старше землянина, как это может показаться, если провести все рассуждения с точки зрения астронавта, считающего свою систему неподвижной. На заре теории относительности некоторые ученые пытались изобретать подобные парадоксы, выдвигая всегда качественные аргументы, основанные на интуитивных ньютоновских представлениях о времени. Количественный анализ должен приводить к правильному выводу, что близнец-астронавт при повторной встрече братьев окажется моложе. Результат этот однозначен и является прямым следствием пересмотра представлений о времени, которого требует частная ТО и необходимость которого подтверждается многими другими экспериментами. Полет к Альфе Центавра остается за гранью современных технических возможностей, однако эксперимент, подтверждающий эффект близнецов, все же был в 1971 проделан. Для этого были использованы очень точные атомные часы, установленные на борту самолета. Полеты осуществлялись вокруг Земли в восточном и западном направлениях, показания часов затем сверялись, и полученные результаты в обоих случаях были очень близки к предсказаниям теории относительности.

Релятивистская динамика.

Все описанные выше явления относятся к «релятивистской кинематике», т.е. могут быть выведены из преобразований Лоренца, которыми вместо преобразований Галилея связаны в частной ТО различные инерциальные системы отсчета. Но чтобы завершить переход к теории относительности, нужно найти замену второму закону Ньютона. Мы должны перейти к релятивистской динамике, рассматривающей влияние сил на движение тел. Новый закон движения должен удовлетворять следующим требованиям.

1. Его форма должна сохраняться при преобразованиях Лоренца, иначе возможны такие особые инерциальные системы отсчета, в которых закон имеет

²⁵ Не видно никакой другой причины подобной асимметрии, кроме неодинаковых скоростей разных систем отсчета по отношению к скорости света. В самом деле, скорость астронавта ближе к скорости света, нежели скорость землянина, поэтому время в системе астронавта течет медленнее, чем на Земле. В этом и только в этом - неравноправие систем. Но тогда получается, что скорость света имеет некий абсолютный характер и является аналогом абсолютного пространства Ньютона. Вот почему, вероятно, Эйнштейн называл иногда свою теорию не теорией относительности, а теорией абсолютности.

наиболее простой вид, что противоречило бы принципу равноправия инерциальных систем отсчета, на котором основана вся теория.

2. При скоростях, малых по сравнению со скоростью света, новый закон движения должен переходить во второй закон Ньютона, иначе возникло бы противоречие с опытными данными для движения с малыми скоростями, когда второй закон Ньютона выполняется.

Этих двух требований достаточно, чтобы более или менее однозначно установить новый закон движения.

Масса и энергия.

Различия между ньютоновскими и релятивистскими уравнениями движения проявляются и в различиях следствий, из них вытекающих. Когда эти различия экспериментально обнаруживаются, то оказывается, что они согласуются с релятивистскими уравнениями.

Первое, что нуждалось в подтверждении, – это зависимость массы от скорости. Частица, движущаяся с очень большой скоростью, согласно частной ТО, движется приблизительно так же, как и в ньютоновской механике, но ее масса должна следующим образом зависеть от скорости:

$$m = \gamma m_0 = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2},$$

где m_0 – масса частицы, измеренная в системе, в которой частица (пусть даже временно) покоится; масса m_0 называется массой покоя или собственной массой. С этой квазиньютоновской точки зрения масса возрастает с увеличением скорости и стремится к бесконечности при приближении скорости частицы к скорости света. Это не парадокс, а лишь результат «ньютоновской» интерпретации релятивистского уравнения.

При малых скоростях, разлагая квадратный корень в ряд, получаем приближенно

$$m = m_0 + (m_0 v^2 / 2) / c^2 + \dots,$$

где многоточием обозначены члены более высокого порядка малости, чем $(v/c)^2$.

Изменение массы с изменением скорости впервые наблюдалось В. Кауфманом, а затем было подтверждено более точными опытами. Релятивистская зависимость массы от скорости подтверждается и экспериментами на ускорителях, которые проектируются с учетом этой зависимости и иначе не работали бы.

Еще одно важное следствие из релятивистской формулы – эквивалентность массы и энергии. Энергия E , входящая в релятивистский закон сохранения энергии, обычно записывается в виде массы m , умноженной на c^2 :

$$E = mc^2 = \gamma m_0 c^2.$$

Это выражение можно разложить так же, как и выражение для массы:

$$E = m_0 c^2 + (1/2) m_0 v^2 + \dots$$

Второй член совпадает с обычной формулой для ньютоновской кинетической энергии (многоточием обозначены члены, которые становятся существенными лишь при очень больших скоростях). Эти два равенства интерпретируются следующим образом: масса тела изменяется точно так же, как и энергия, заключенная в теле, причем выражение для энергии должно содержать постоянное слагаемое – так называемую энергию покоя m_0c^2 , соответствующую массе покоя; при этом соотношение между массой и энергией имеет вид прямой пропорциональности с коэффициентом c^2 .

Из эквивалентности массы и энергии вытекает много следствий. Одно из наиболее впечатляющих – аннигиляция пары частиц и полное превращение их суммарной массы в излучение с соответствующей энергией. Такая аннигиляция наблюдается для пары электрон – позитрон (электрон заряжен отрицательно, а позитрон положительно) и для пары протон – антипротон. Эквивалентностью массы и энергии объясняется происхождение энергии звезд, она лежит в основе принципов получения атомной энергии и создания ядерного оружия, использующего деление и синтез ядер.

Так, энергия, излучаемая звездами, и энергия взрыва водородной бомбы имеют одинаковое происхождение. Четыре ядра водорода могут объединиться и образовать одно ядро гелия, причем масса ядра гелия будет меньше массы четырех ядер водорода, взятых порознь. Избыточная масса высвобождается в виде излучения, энергия которого связана с этой массой соотношением $E = mc^2$. Большой энергетический выход таких источников энергии объясняется тем, что множитель c^2 в этом уравнении очень велик – $9 \cdot 10^{16} \text{ (м/с)}^2$. Превращение водорода в гелий различными путями является основным источником звездной энергии, а также энергии, высвобождаемой при термоядерных взрывах. Энергия атомной (не водородной) бомбы и реакторов атомных электростанций обусловлена реакцией деления ядер: ядро урана или плутония расщепляется на две или более части, суммарная масса которых меньше массы исходного ядра, а избыток энергии выделяется частично в виде излучения, а частично в виде кинетической энергии продуктов деления.

Множество других приложений частной ТО практически во всех областях современной физики убедительно продемонстрировали ее правильность и превосходство над теорией Ньютона там, где предсказания этих двух теорий существенно различны. Далее мы перейдем к обобщению частной ТО, необходимому для адекватного рассмотрения явления тяготения.

6.3. Общая теория относительности

Действие заданных сил описывается вторым законом движения Ньютона или соответствующими релятивистскими законами. Однако источники сил должны быть описаны дополнительными гипотезами. В теории Ньютона сила гравитации дается ньютоновским законом всемирного тяготения, согласно которому любые два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их гравитационных масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Если гравитационные массы двух тел А и В равны M_A и M_B , а расстояние между ними R , то сила равна:

$$F = G \frac{M_A M_B}{R^2},$$

где G – ньютонская гравитационная постоянная, равная $6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$.

Этот закон можно представить в иной форме, если ввести понятие поля сил: напряженность гравитационного поля, создаваемого телом А, в точке, находящейся на расстоянии R от него, равна силе, действующей на единичную пробную массу, помещенную в эту точку:

$$E_A = GM_A/R^2.$$

Ньютон показал, что притяжение однородного сферического тела можно вычислять, принимая, что вся его масса сосредоточена в центре сферы. Поскольку Земля имеет приблизительно сферическую форму, напряженность создаваемого ею гравитационного поля на ее поверхности равна:

$$g = GM_{\text{Земли}}/(R_{\text{Земли}})^2 \approx 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Это – просто ускорение силы тяжести, т.е. скорость увеличения скорости падающего тела.

Выражение для напряженности гравитационного поля, создаваемого телом А, характеризует его способность воздействовать с силой притяжения на другие тела. Сила же, действующая на любое другое тело, равна произведению напряженности поля E_A на массу этого тела:

$$F = E_A M_B,$$

что согласуется с первым из приведенных выше выражений для силы притяжения между двумя телами. Из закона сохранения импульса следует, что все эти рассуждения остаются справедливыми, если два тела поменять местами. Таким образом, напряженность гравитационного поля, создаваемого телом В, равна $E_B = GM_B/R^2$, а сила, действующая на тело А со стороны тела В, равна $F = E_B M_A$. Поведение системы из нескольких тел можно объяснить, рассмотрев силы, действующие на каждое тело со стороны всех других.

С современной точки зрения закон всемирного тяготения Ньютона имеет два недостатка, один очевидный, другой – более тонкий. Очевидный недостаток состоит в том, что закон неинвариантен относительно преобразований Лоренца и, следовательно, противоречит частной ТО. Сила, которую дает закон Ньютона в каждый конкретный момент времени, определяется расстоянием между телами, существующими в этот момент времени. Но мы уже видели, что расстояние между двумя телами в данный момент зависит от системы отсчета, в которой проводятся измерения, как и сам «данный момент».

Можно, конечно, модифицировать закон всемирного тяготения таким образом, чтобы он согласовался с частной ТО. И ряд подобных модификаций был предложен вскоре после создания частной ТО. Однако все они, как и теория Ньютона, страдали другим, более тонким недостатком, избавиться от которого удалось лишь в общей теории относительности (ОТО). Эти модификации представляют сейчас лишь исторический интерес и рассматриваться здесь не будут,

а об упомянутом недостатке, предложенном Эйнштейном, и средстве избавления от него будет сказано в следующем разделе.

Гравитационная и инертная массы. Понятие массы выступало выше в двух разных аспектах. В законах движения, ньютоновских и релятивистских, которые описывают действие заданных сил, масса характеризует сопротивляемость тела – его инерцию – по отношению к силам, стремящимся изменить его движение. В этом случае массу называют инертной. В ньютоновском же законе всемирного тяготения масса выступает как фактор, определяющий гравитационные силы, вызываемые данными телами, и здесь масса называется гравитационной. И нет оснований заранее предполагать, что эти массы связаны между собой. Иногда, чтобы подчеркнуть различие между ними, гравитационную массу даже называют гравитационным зарядом. Имеются, однако, очень точные экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что обе массы пропорциональны друг другу, причем коэффициент пропорциональности для всех известных веществ один и тот же (подбором удобной системы единиц он может быть сделан равным 1).

Одним из таких свидетельств, известным, по крайней мере, еще со времен Галилея, является факт одинаково быстрого падения всех тел (если пренебречь сопротивлением воздуха). Большой свинцовый груз сильнее притягивается Землей, чем маленький грузик, и все же *он не падает с большим ускорением, поскольку большая сила компенсируется и большей инерцией*. Опять-таки, свинцовый и стальной грузики, уравновешенные на весах и, следовательно, имеющие равные гравитационные массы, падают с одинаковым ускорением и потому имеют также равные инертные массы.

Пусть m_a , m_b – инертные, а M_A , M_B – гравитационные массы тел А и В. Обозначим F_A и F_B гравитационные силы, действующие на эти тела со стороны Земли и вызывающие движение с ускорениями a_A и a_B , и примем, что, как и прежде, $g = GM_{\text{Земли}}/(R_{\text{Земли}})^2$. Из закона движения получаем

$$F_A = m_A a_A; F_B = m_B a_B,$$

а из закона всемирного тяготения

$$F_A = gM_A; F_B = gM_B.$$

Наблюдения показывают, что все тела падают с одинаковым ускорением, т.е. $a_A = a_B$. Поэтому, приравнивая попарно выражения для F_A и F_B , получаем

$$m_A/M_A = m_B/M_B,$$

что и требовалось, а именно: отношение гравитационной массы к инертной одинаково для различных тел.

Впервые точные измерения, подтвердившие пропорциональность гравитационной и инертной масс, были выполнены Р. Этвешем с сотрудниками в начале 20 в. Спустя 70 лет Р. Дикке в Принстоне и В.Б. Брагинский в Москве еще больше повысили точность таких измерений. Весы, к которым подвешивались грузы из различных материалов, были столь чувствительны, что если бы отношение гравитационной массы к инертной для этих материалов было неодинаковым, то из-за гравитационного воздействия Солнца был бы зарегистрирован эффект, изменяющийся на протяжении суток в соответствии с вращением Зем-

ли вокруг своей оси. Но в пределах погрешности порядка $1 \cdot 10^{-12}$ такой эффект не был обнаружен.

Относительность инерции. Другой общий недостаток механики Ньютона, выявленный в 19 в., – в значительной мере благодаря Э. Маху (1838–1916) – связан с тем, что она базируется на понятиях абсолютного пространства и абсолютного времени. Основная трудность, к которой это приводило, состояла в том, что *нет никаких экспериментальных методов идентификации ни пространства, ни времени.* Все мыслимые измерения – это *измерения относительных положений, движений и отрезков времени.* Почему бы, спрашивал Мах, вместо равномерного движения относительно абсолютного пространства в качестве критерия инерциальной системы отсчета не рассматривать равномерное движение относительно удаленных звезд? Мах пытался изменить ньютоновскую механику таким образом, чтобы согласовать ее с этими соображениями, однако столкнулся с трудностями, проистекающими главным образом из-за того, что его модификации не были достаточно революционными. Частная ТО не отвечала требованиям Маха – она «всего лишь» объединила абсолютное пространство и абсолютное время в абсолютное пространство-время, против которого можно было бы выдвинуть те же возражения, что и против абсолютного пространства и времени по отдельности.

Мысль Маха о желательных изменениях в механике можно кратко выразить в «принципе относительности инерции», который Эйнштейн, нашедшийся под сильным влиянием Маха, сформулировал в следующем виде: *не может быть инерции относительно пространства; есть лишь инерция масс друг относительно друга.* Анализ этого положения привел Эйнштейна к выводу, что с учетом гравитационного поля можно рассматривать как относительное не только равномерное движение, но и движение ускоренное. Это означает, что галилеевская инвариантность предъявляет слишком жесткие требования к эквивалентным системам отсчета. Эйнштейн выдвинул положение, что «законы физики должны быть применимы в системах отсчета, движущихся как угодно». Исходя из этого, он сформулировал *принцип эквивалентности, согласно которому силы гравитации и силы инерции невозможно различить по результатам локальных механических опытов.*

На этой основе он предложил новую теорию, в которой пропорциональность гравитационной и инертной масс оказывалась необходимым следствием, а не случайностью, как в механике Ньютона. Что же касается маховской критики представлений об абсолютном пространстве и абсолютном времени, то она учитывалась введением положения, что свойства пространства-времени должны вытекать из распределения вещества, а не быть независимыми от него.

Принцип эквивалентности. Ньютоновский закон движения и соответствующий релятивистский закон выполняются только в инерциальных системах отсчета. Если же измерения проводятся относительно некоторой другой системы, то в закон необходимо ввести новые слагаемые, чтобы учесть ускоренное движение. Так, в системе отсчета, вращающейся относительно инерциальной, дополнительные слагаемые представляют собой центробежную и кориолисову силы инерции. Указанные дополнительные члены содержат в качестве множи-

теля инертную массу. Эти силы называют силами инерции, а вследствие эквивалентности инертной и гравитационной масс они входят в закон движения наравне с гравитационными силами. Это заключение, важность которого Эйнштейн понял за несколько лет до того, как сформулировал ОТО, есть одно из выражений принципа эквивалентности.

Эйнштейн проиллюстрировал данный принцип знаменитым мысленным экспериментом в лифте. (Осуществить такой эксперимент было бы технически сложно, но он помогает понять суть теории.) Этот эксперимент проводит ученый, который, находясь в лифте, выполняет четыре опыта:

1. Лифт стоит на поверхности Земли. Ученый в лифте выпускает из руки груз и видит, что он с ускорением падает на пол.

2. Лифт свободно падает в лифтной шахте (из которой откачан воздух для устранения его сопротивления). Ученый снова выпускает из рук груз, но, поскольку теперь и лифт, и груз находятся в состоянии свободного падения, груз «зависает» где-то между полом и потолком лифта (силами притяжения груза к лифту и телу ученого можно пренебречь).

Следующие два опыта выполняются в космическом пространстве, далеко от Земли, где всеми гравитационными полями можно пренебречь.

3. Лифт ускоряется вверх в вертикальном направлении с прикрепленным к нему ракетным двигателем. Если ускорение лифта равно $9,8 \text{ м/с}^2$, то, когда ученый выпускает груз, он обнаруживает, что груз падает с таким же ускорением, как и в первом опыте. В отсутствие сил груз не должен приобретать ускорения, но благодаря ускоренному движению лифта ученый видит, что груз с ускорением падает вниз.

4. Лифт находится в космосе без ускорения, но по-прежнему далеко от Земли. Поскольку заметные гравитационные поля отсутствуют, когда ученый выпускает из рук второй груз, последний «зависает», как это было во втором опыте.

Как явствует из опытов, действие гравитационного поля точно такое же, как и сил инерции, обусловленных ускоренным движением лифта. Это и есть непосредственное выражение принципа эквивалентности.

Основные следствия ОТО

Важно понять, что за небольшими исключениями эйнштейновская теория предсказывает те же явления гравитации, что и ньютоновская. Таким образом, все явления, хорошо описываемые ньютоновской теорией тяготения, столь же хорошо описываются ОТО. Кроме того, ОТО снимает возражения Маха против ньютоновских концепций абсолютных пространства и времени.

В то же время все предсказания частной ТО непосредственно могут быть получены из ОТО, поскольку ОТО включает в себя частную ТО как частный случай, когда гравитационным полем можно пренебречь. Все же некоторые выводы ОТО отличаются от предсказаний ньютоновской теории. Предсказываемые эффекты, в которых проявляется различие между обеими теориями, зачастую слишком малы, чтобы их можно было обнаружить существующими мето-

дами, но там, где эти различия все же обнаруживаются, чаша весов склоняется в пользу ОТО. Опишем теперь три классических опыта по проверке ОТО и соответствующие экспериментальные результаты.

Смещение перигелия орбиты. Согласно законам Кеплера, планеты Солнечной системы движутся по эллипсам, в общем фокусе которых находится Солнце. Это не вполне соответствует ньютоновской теории. Планеты не только притягиваются Солнцем, но и притягиваются друг к другу, хотя и гораздо слабее, чем к Солнцу, поскольку их массы намного меньше массы Солнца. Но если учесть эти малые взаимные возмущения, то наблюдаемое движение планет вполне согласуется с предсказаниями ньютоновской теории, за исключением малых деталей. Наиболее известное и подробно исследованное расхождение между теорией и экспериментом – так называемое смещение перигелия Меркурия, регистрируемое с начала 19 в., на 43 угловые секунды за сто Перигелий – точка максимального приближения планеты к Солнцу. Из-за возмущающего действия других планет положение перигелия слегка изменяется при каждом орбитальном прохождении планеты через эту точку (рис. 12). Однако наблюдаемое смещение перигелия больше предсказываемого ньютоновской теорией. Предлагались разные объяснения этого, в том числе гипотеза о существовании внутри орбиты Меркурия некой другой планеты (названной Вулканом) и модификация закона всемирного тяготения, но каждое из них приводило к новым противоречиям с данными астрономических наблюдений. Теория Эйнштейна объяснила смещение перигелия Меркурия без каких-либо дополнительных предположений. В случае других планет этот эффект оказывается слишком малым, и его пока не удается измерить.

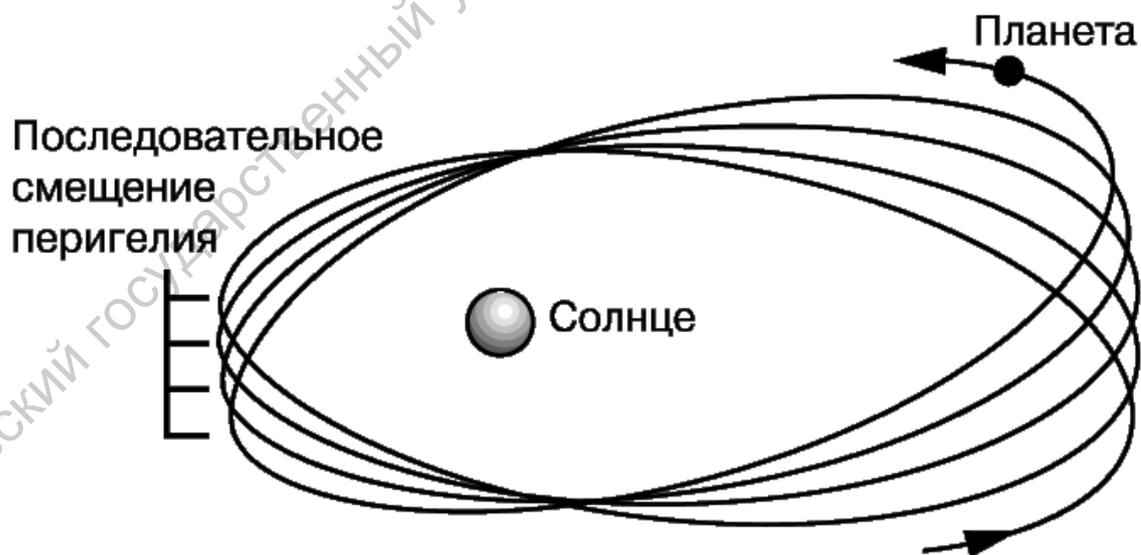


Рис. 3.5. Смещение перигелия планеты – это изменение положения ее эллиптической орбиты относительно Солнца. С давних пор известно расхождение между предсказаниями ньютоновской теории и результатами наблюдений за перигелием Меркурия. То, что это отклонение удалось объяснить воздействием на планету сильного гравитационного поля Солнца, явилось одним из важнейших свидетельств в пользу ОТО.

Отклонение света. Другим предсказанием ОТО является искривление светового луча или другого электромагнитного излучения при прохождении вблизи массивного объекта, например Солнца. Аналогичное отклонение следует и из ньютоновской теории тяготения, но ОТО предсказывает вдвое больший эффект. (В соответствии с ОТО луч должен отклоняться к объекту на расстояние, пропорциональное его массе и обратно пропорциональное минимальному расстоянию между ним и лучом.) Из этого следует, например, что если некий астроном, находящийся на Земле, фиксирует положение какой-нибудь звезды, находящейся практически на одной линии с Солнцем (так, что свет от звезды проходит в непосредственной близости от Солнца), и затем делает то же самое в другое время года, когда Солнце находится в другой части неба и когда его действием на свет от звезды можно пренебречь, то он обнаружит, что свет от одной и той же звезды пришел по двум слегка различающимся направлениям. Если Солнце наблюдается на фоне звезд, то те из них, которые ближе всего к Солнцу, должны обнаруживать наибольшее радиальное смещение от него относительно своего положения в отсутствие Солнца в данной части небосвода.

Однако наблюдение звезд, находящихся вблизи солнечного диска, затруднено, поскольку солнечный свет не позволяет их видеть. Такая возможность появляется во время полного солнечного затмения, когда звезды вблизи диска становятся видимыми на небе и их можно сфотографировать. Если через несколько месяцев сделать ночью новую фотографию, когда Солнце находится далеко, то можно сравнить два положения звезды. Различие, предсказываемое теорией, достаточно велико и составляет 1,74 угловой секунды для звезд, свет которых проходит вблизи солнечного диска. Такая величина без особых сложностей может быть зарегистрирована.

Первые наблюдения по проверке предсказаний Эйнштейна проводились в период полного затмения Солнца 29 мая 1919 двумя британскими экспедициями, одна из которых базировалась на о. Принсипи вблизи западного побережья Африки, а другая – в Бразилии. Результаты наблюдений подтвердили предсказания теории, а весть об этом успехе сделала с той поры имя Эйнштейна всемирно известным. На самом деле результаты измерений были не очень точными, и за последующие полвека состояние дел кардинально не улучшилось: наблюдения оставались чересчур сложными в техническом отношении.

Ситуация существенно изменилась с начала 1970-х годов благодаря появлению радиоинтерферометров с очень большой базой, в которых используются совместно работающие радиотелескопы, расположенные на разных континентах и отстоящие друг от друга на тысячи километров. Наблюдения в радиодиапазоне могут проводиться в любое время, а не только во время затмений. Совместно работающие радиотелескопы, расположенные далеко друг от друга, позволяют очень точно измерять направление на источник радиосигнала. Поскольку на протяжении года в пределах нескольких градусов от Солнца (при наблюдении с Земли) проходит целый ряд мощных квазизвездных источников радиоизлучения (квазаров), было проделано несколько тысяч измерений. Результаты подтверждают предсказания теории Эйнштейна в пределах погрешно-

сти 0,1 - 0,2%, т.е. с точностью, в 100 раз более высокой, чем в прежних экспериментах по наблюдению звезд во время затмений.

Гравитационное красное смещение. Еще одно следствие ОТО, на которое указал Эйнштейн, – зависимость наблюдаемой энергии фотона (частицы света) от его местоположения в гравитационном поле. Так как энергия пропорциональна частоте (по закону Планка $E = h\nu$), наблюдаемая частота тоже должна зависеть от местоположения. Так, например, фотон, соответствующий некоторой спектральной линии в спектре излучения какого-то атома на Солнце и впоследствии поглощенный на Земле, должен в момент прихода на Землю иметь частоту, на 1/400 000 меньшую, чем у такого же фотона, испущенного таким же атомом на Земле. В принципе это различие можно было бы обнаружить спектроскопическими методами, если бы не ряд мешающих факторов (таких, например, как доплеровское смещение частоты вследствие движения излучающего атома), которые пока что затрудняют однозначную интерпретацию результатов наблюдения за Солнцем.

В 1959 Р. Паунд с сотрудниками в Гарвардском университете провел эксперимент, основанный на возбуждении в земных условиях излучения некоторого атома с частотой, задаваемой с очень высокой точностью. Успеху эксперимента мешали трудности исключения неконтролируемого изменения частоты, обусловленного отдачей излучающего атома. Позднее задача была решена использованием излучающего атома, закрепленного в решетке некоторого кристалла: в этом случае отдачу принимает на себя весь кристалл, а потому она становится пренебрежимо малой.

В результате оказалось возможным регистрировать изменения в частоте излучения, «падающего» в гравитационном поле в пределах всего лишь 30 м. Результаты подтверждают предсказания Эйнштейна с точностью до 1%.

Задержка времени распространения света. Еще одно поддающееся экспериментальной проверке следствие ОТО, связанное с отклонением света, было обнаружено только в 1964. Это замедление света в поле тяготения, впервые предсказанное И. Шапиро из Массачусетского технологического института (США). Шапиро указал на то, что вблизи большого тела, каким является Солнце, свет и радиосигнал должны не только отклоняться, но и распространяться с меньшей скоростью. Для сигнала, проходящего вблизи Солнца, время задержки может достигать 20 мкс, что легко обнаружить современными техническими средствами. Шапиро с сотрудниками измерили время прохождения сигналов, отраженных от Меркурия и Венеры, а позднее провели более точные измерения с автоматическими межпланетными станциями серии «Викинг», которые совершили посадку на Марс, а также двигались по орбите вокруг Марса. Результаты измерений с помощью этих космических аппаратов подтвердили проверку Шапиро предсказаний ОТО с точностью 0,1%.

Гравитационные волны. Гравитационная волна – это колебания гравитационного поля, которые, подобно свету и другим электромагнитным волнам, могут переносить энергию. В теории Ньютона нет ничего подобного, но ОТО предсказывает существование гравитационных волн, распространяющихся со скоростью света. Любое вращающееся несимметричное тело, а также система

двух или более тел, движущихся одно относительно другого, должны излучать гравитационные волны. Однако из-за малости гравитационных сил по сравнению с электромагнитными, а отчасти из-за некоторых следствий технического характера, вытекающих из принципа эквивалентности, обнаружить гравитационные волны современными техническими средствами намного сложнее, чем электромагнитные. Существует, однако, убедительное косвенное подтверждение существования гравитационных волн, а также предсказаний ОТО, касающихся количества энергии, переносимой гравитационными волнами. Эти данные получены в процессе исследования знаменитого теперь астрономического объекта – двойного пульсара PSR 1913+16, открытого в 1975 Р. Халсом и Д. Тейлором в обсерватории Аресибо (Пуэрто-Рико).

Пульсар представляет собой быстро вращающуюся нейтронную звезду, генерирующую направленный пучок радиоволн, подобный лучу вращающегося прожектора. При регистрации их на Земле фиксируется импульсное излучение с периодом, равным периоду вращения нейтронной звезды. Двойной пульсар состоит из двух вращающихся вокруг общего центра масс звезд, при этом одна звезда – радиопульсар, а другая – либо тоже нейтронная звезда, либо белый карлик. Движение пульсара по его орбите может быть с большой точностью прослежено путем измерения времени прихода радиоимпульсов. Согласно ОТО, если система излучает гравитационные волны, то орбита пульсара должна немного изменяться. Регулярные наблюдения за пульсаром PSR 1913+16 убедительно показывают, что он излучает гравитационные волны с предсказываемой ОТО интенсивностью.

Множество отмеченных выше разнообразных экспериментов и наблюдений дает общей теории относительности ту основу, которой она не имела до 1960-х годов и благодаря которой тяготение теперь оказалось в главном русле современной физики. Проблемы ОТО и тяготения нашли отражение в известном перечне лауреата Нобелевской премии В.Л. Гинзбурга «Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века?»²⁶

²⁶ Гинзбург В.Л. Успехи физических наук, 1999, **169**, с. 419.

РАЗДЕЛ 4. ФИЗИКА МИКРОМИРА

7. Квантовая механика²⁷

Фундаментальная физическая теория динамического поведения всех элементарных форм вещества и излучения, а также их взаимодействий.

Квантовая механика представляет собой теоретическую основу, на которой строится современная теория атомов, атомных ядер, молекул и физических тел, а также элементарных частиц, из которых все это состоит.

Квантовая механика была создана учеными, стремившимися понять, как устроен атом. Атомные процессы в течение многих лет изучали физики и особенно химики; при изложении данного вопроса мы будем, не вдаваясь в подробности теории, следовать историческому ходу развития предмета.

7.1. История квантовых представлений

Зарождение теории. Когда Э. Резерфорд и Н. Бор предложили в 1911 году ядерную модель атома, это было подобно чуду. В самом деле, она была построена из того, что было известно уже более 200 лет. Это была, в сущности, коперниканская модель Солнечной системы, воспроизведенная в микроскопическом масштабе: в центре находится тяжелая масса, вскоре получившая название ядра, вокруг которой вращаются электроны, числом которых определяются химические свойства атома. Но мало того, за этой наглядной моделью стояла теория, которая позволила начать расчеты некоторых химических и физических свойств веществ, по крайней мере, построенных из наименьших и наиболее простых атомов. Теория Бора – Резерфорда содержала ряд положений, которые здесь полезно напомнить, поскольку все они в том или ином виде сохранились и в современной теории.

Во-первых, важен вопрос о природе сил, связывающих атом. С 18 в. было известно, что электрически заряженные тела притягивают или отталкивают друг друга с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Используя в качестве пробных тел альфа-частицы, возникающие в результате радиоактивных превращений, Резерфорд показал, что тот же самый закон электрического взаимодействия (закон Кулона) справедлив в масштабах, в миллион миллионов раз меньших тех, для которых он был первоначально экспериментально установлен.

Во-вторых, нужно было ответить на вопрос о том, как электроны движутся по орбитам под действием этих сил. Здесь вновь опыты Резерфорда, казалось бы, показывали (и Бор принял это в своей теории), что законы движения Ньютона, сформулированные в его Началах (*Principia Mathematica*, 1687), можно

²⁷ ЛИТЕРАТУРА: Вихман Э. Квантовая физика. М., 1977. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. М., 1985 Мигдал А.Б. Квантовая физика для больших и маленьких. М., 1989. Волкова Е.Л. и др. Квантовая механика на персональном компьютере. М., 1995.

использовать для описания движения частиц в этих новых масштабах микромира.

В-третьих, вставал вопрос о стабильности. В ньютоновско-кулоновском атоме, как и в Солнечной системе, размеры орбит произвольны и зависят лишь от того, каким образом система была первоначально приведена в движение. Однако все атомы одного вещества одинаковы и к тому же стабильны, что совсем необъяснимо с точки зрения старых представлений. Бор высказал предположение, что атомные электроны следует рассматривать как движущиеся вокруг ядра лишь по определенным орбитам, которым отвечают определенные энергетические уровни, причем они должны испускать квант энергии в виде света, переходя с орбиты с более высокой энергией на орбиту с меньшей энергией. Такие «условия квантования» не вытекали ни из каких экспериментальных данных или теорий; они были приняты как постулаты.

На основе этих концептуальных элементов, дополненных только что развитыми в то время представлениями М. Планка и А. Эйнштейна о природе света, Бору удалось количественно объяснить весь спектр излучения атомов водорода в газоразрядной трубке и дать качественное объяснение всех основных закономерностей периодической системы элементов. К 1920 пришло время взяться за проблему спектра излучения более тяжелых атомов и вычислить интенсивность химических сил, связывающих атомы в соединениях.

Но здесь иллюзия успеха померкла. На протяжении ряда лет Бор и другие исследователи *безуспешно пытались рассчитать спектр гелия* – следующего за водородом простейшего атома с двумя электронами. Сначала вообще ничего не получалось; в конце концов, несколько исследователей различными способами решили эту задачу, но ответ оказался неверным – он противоречил эксперименту. Затем выяснилось, что *вообще невозможно построить сколько-нибудь приемлемую теорию химического взаимодействия*. К началу 1920-х годов теория Бора исчерпала себя. Пришло время признать справедливость пророческого замечания, которое Бор еще в 1914 сделал в письме другу в присутствии ему замысловатом стиле: «Я склонен полагать, что проблема связана с исключительно большими трудностями, которые можно будет преодолеть, лишь гораздо дальше отойдя от обычных соображений, чем требовалось до сих пор, и что достигнутый ранее успех был обусловлен исключительно простотой рассматривавшихся систем».

Первые шаги. Поскольку использованная Бором комбинация существовавших ранее представлений из области электричества и механики с условиями квантования привела к неверным результатам, все это нужно было полностью или частично изменить. Основные положения теории Бора были приведены выше, а для соответствующих расчетов было достаточно не очень сложных выкладок с использованием обычной алгебры и математического анализа. В 1925 молодой немецкий физик В. Гейзенберг посетил Бора в Копенгагене, где провел с ним долгие часы в беседах, выясняя, что из теории Бора обязательно должно войти в будущую теорию, а от чего в принципе можно и отказаться.

Бор и Гейзенберг сразу же согласились, что *в будущей теории обязательно должно быть представлено все непосредственно наблюдаемое*, а все не

поддающееся наблюдению может быть изменено или исключено из рассмотрения. С самого начала Гейзенберг считал, что следует сохранить атомы, но орбиту электрона в атоме считать абстрактной идеей, поскольку ни один эксперимент не позволяет определить электронную орбиту по результатам измерений наподобие того, как это можно сделать для орбит планет. Читатель может заметить, что тут есть определенная нелогичность: строго говоря, атом столь же не наблюдаем непосредственно, как и электронные орбиты, и вообще в нашем восприятии окружающего мира нет ни одного ощущения, которое не требовало бы разъяснения. В наши дни физики все чаще цитируют известный афоризм, который был впервые произнесен Эйнштейном в беседе с Гейзенбергом: **«Что именно мы наблюдаем, нам говорит теория»**. Таким образом, различие между наблюдаемыми и ненаблюдаемыми величинами носит чисто практический характер, не имея никакого обоснования ни в строгой логике, ни в психологии, причем это различие, как бы оно ни проводилось, должно рассматриваться как часть самой теории.

Поэтому гейзенберговский идеал теории, очищенной от всего ненаблюдаемого, есть некое направление мысли, но отнюдь не последовательный научный подход. Тем не менее, он доминировал в атомной теории почти полвека после того, как был впервые сформулирован. Мы уже упоминали о составных элементах ранней модели Бора, таких, как закон Кулона для электрических сил, законы динамики Ньютона и обычные правила алгебры. Путем тонкого анализа Гейзенберг показал, что можно сохранить известные законы электричества и динамики, если найти надлежащее выражение для динамики Ньютона, а затем изменить правила алгебры. В частности, Гейзенберг высказал мысль, что, поскольку ни положение q , ни импульс p электрона не являются измеримыми величинами в том смысле, в каком ими являются, например, положение и импульс автомобиля, мы можем при желании сохранить их в теории, лишь рассматривая как математические символы, обозначаемые буквами, но не как числа. Он принял для p и q алгебраические правила, согласно которым произведение pq не совпадает с произведением qp . Гейзенберг показал, что простые расчеты атомных систем дают приемлемые результаты, если принять, что для положения q и импульса p выполняется соотношение

$$qp - pq = ih/2\pi \quad (4.1)$$

где h – постоянная Планка, уже известная из квантовой теории излучения и фигурировавшая в теории Бора, а $i = \sqrt{-1}$. Постоянная Планка h представляет собой обычное число, но очень малое, приблизительно $6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж*с. Таким образом, если p и q – величины обычного масштаба, то разность произведений pq и qp будет крайне мала по сравнению с самими этими произведениями, так что p и q можно считать обычными числами. Построенная для описания явлений микромира, теория Гейзенберга почти полностью согласуется с механикой Ньютона, когда ее применяют к макроскопическим объектам. Уже в самых ранних работах Гейзенберга было показано, что **при всей неясности физического содержания новой теории она предсказывает существование дискретных энергетических состояний**, характерных для квантовых явлений

(например, для испускания света атомом). В более поздней работе, выполненной совместно с М. Борном и П. Йорданом в Гёттингене, Гейзенберг развил формальный математический аппарат теории. Практические вычисления остались, однако, крайне сложными. После нескольких недель напряженной работы В. Паули вывел формулу для энергетических уровней атома водорода, совпадающую с формулой Бора. Но прежде чем удалось упростить вычисления, появились новые и совершенно неожиданные идеи.

Частицы и волны. К 1920 физики были уже довольно хорошо знакомы с двойственной природой света: результаты одних экспериментов со светом можно было объяснить, предполагая, что свет представляет собой волны, а в других он вел себя подобно потоку частиц. Поскольку казалось очевидным, что ничто не может быть в одно и то же время и волной, и частицей, ситуация оставалась непонятной, вызывая горячие споры в среде специалистов. В 1923 французский физик Л. де Бройль в опубликованных им заметках высказал предположение, что столь парадоксальное поведение, может быть, не является спецификой света, но и вещество тоже может в одних случаях вести себя подобно частицам, а в других подобно волнам. Исходя из теории относительности, де Бройль показал, что если импульс частицы равен p , то «ассоциированная» с этой частицей волна должна иметь длину волны $\lambda = h/p$. Это соотношение аналогично впервые полученному Планком и Эйнштейном соотношению $E = h\nu$ между энергией светового кванта E и частотой ν соответствующей волны. Де Бройль показал также, что эту гипотезу можно легко проверить в экспериментах, аналогичных опыту, демонстрирующему волновую природу света, и настойчиво призывал к проведению таких опытов. Заметки де Бройля привлекли внимание Эйнштейна, и к 1927 Клинтон Дэвиссон и Лестер Джермер в Соединенных Штатах, а также Джозеф Томсон в Англии подтвердили для электронов не только основную идею де Бройля, но и его формулу для длины волны. В 1926 работавший тогда в Цюрихе австрийский физик Эрвин Шрёдингер, прослышав о работе де Бройля и предварительных результатах экспериментов, подтверждавших ее, опубликовал четыре статьи, в которых представил новую теорию, явившуюся прочным математическим обоснованием этих идей.

7.2. Уравнение Шрёдингера

Такая ситуация имеет свой аналог в истории оптики. Одной уверенности в том, что свет есть волна определенной длины, недостаточно для детального описания поведения света. Необходимо еще написать и решить выведенные Дж. Максвеллом дифференциальные уравнения, подробно описывающие процессы взаимодействия света с веществом и распространение света в пространстве в виде электромагнитного поля. Шрёдингер написал дифференциальное уравнение для материальных волн де Бройля, аналогичное уравнениям Максвелла для света. Стационарное уравнение Шрёдингера для одной частицы имеет вид

$$\frac{h^2}{8\pi^2m} \Delta \psi + [E - V(x, y, z)]\psi = 0.$$

Зависимость от времени дает

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \Delta \psi + V(x, y, z) \psi = \frac{i\hbar}{2\pi} * \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \text{или} \quad i \frac{\hbar}{2\pi} * \frac{\partial \psi}{\partial t} = H \psi ,$$

где m – масса частицы, E – ее полная энергия, $V(x)$ – потенциальная энергия, H – гамильтониан, а ψ – величина, описывающая электронную волну (волновая функция). В ряде работ Шрёдингер показал, как можно использовать его уравнение для вычисления энергетических уровней атома водорода. Он установил также, что существуют простые и эффективные способы приближенного решения задач, не поддающихся точному решению, и что его теория волн материи в математическом отношении полностью эквивалентна алгебраической теории наблюдаемых величин Гейзенберга и во всех случаях приводит к тем же результатам. П. Дирак из Кембриджского университета показал, что теории Гейзенберга и Шрёдингера представляют собой лишь две из множества возможных форм теории. Теория преобразований Дирака, в которой важнейшую роль играет соотношение (1), обеспечила ясную общую формулировку квантовой механики, охватывающую все остальные ее формулировки в качестве частных случаев.

Вскоре Дирак добился неожиданно крупного успеха, продемонстрировав, каким образом квантовая механика обобщается на область очень больших скоростей, т.е. приобретает вид, удовлетворяющий требованиям теории относительности. Постепенно стало ясно, что существует несколько релятивистских волновых уравнений, каждое из которых в случае малых скоростей можно аппроксимировать уравнением Шрёдингера, и что эти уравнения описывают частицы совершенно разных типов. Например, частицы могут иметь разный «спин»; это предусматривается теорией Дирака. Кроме того, согласно релятивистской теории, каждой из частиц должна соответствовать античастица с противоположным знаком электрического заряда. В то время, когда вышла работа Дирака, были известны только три элементарные частицы: фотон, электрон и протон. В 1932 была открыта античастица электрона – позитрон. На протяжении нескольких последующих десятилетий было обнаружено много других античастиц, большинство из которых, как оказалось, удовлетворяли уравнению Дирака или его обобщениям. Созданная в 1925–1928 усилиями выдающихся физиков квантовая механика не претерпела с тех пор в своих основах каких-либо существенных изменений.

Приложения. Во всех разделах физики, биологии, химии и техники, в которых существенны свойства вещества в малых масштабах, теперь систематически обращаются к квантовой механике. Приведем несколько примеров. Всесторонне исследована структура электронных орбит, наиболее удаленных от ядра атомов. Методы квантовой механики были применены к проблемам строения молекул, что привело к революции в химии. Структура молекул обусловлена химическими связями атомов, и сегодня сложные задачи, возникающие при последовательном применении квантовой механики в этой области, решаются с помощью компьютеров. Большое внимание привлекли к себе тео-

рия кристаллической структуры твердых тел и особенно теория электрических свойств кристаллов. Практические результаты впечатляют: примерами их могут служить изобретение лазеров и транзисторов, а также значительные успехи в объяснении явления сверхпроводимости.

Многие проблемы еще не решены. Это касается структуры атомного ядра и физики элементарных частиц. Время от времени обсуждается вопрос о том, не лежат ли проблемы физики элементарных частиц за пределами квантовой механики, подобно тому, как структура атомов оказалась вне области применимости динамики Ньютона. Однако до сих пор нет никаких указаний на то, что принципы квантовой механики или ее обобщения в области динамики полей где-то оказались неприменимыми. **Более полувека квантовая механика остается научным инструментом с уникальной «объясняющей способностью»** и не требует существенных изменений своей математической структуры. **Поэтому может показаться удивительным, что до сих пор ведутся острые дебаты (см. ниже) по поводу физического смысла квантовой механики** и ее истолкования.

7.3. О физическом смысле квантовой механики

Корпускулярно-волновой дуализм, столь очевидный в эксперименте, создает одну из самых трудных проблем физической интерпретации математического формализма квантовой механики. Рассмотрим, например, волновую функцию, которая описывает частицу, свободно движущуюся в пространстве. Традиционное представление о частице, помимо прочего, предполагает, что она движется по определенной траектории с определенным импульсом p . Волновой функции приписывается длина волны де Бройля $\lambda = h/p$, но это характеристика такой волны, которая бесконечна в пространстве, а потому не несет информации о местонахождении частицы. Волновую функцию, локализирующую частицу в определенной области пространства протяженностью Δx , можно построить в виде суперпозиции (пакета) волн с соответствующим набором импульсов, и если искомым диапазоном импульсов равен Δp , то довольно просто показать, что для величин Δx и Δp должно выполняться соотношение

$$\Delta x \cdot \Delta p \leq h/4\pi.$$

Этим соотношением, впервые полученным в 1927 Гейзенбергом, выражается известный принцип неопределенности: чем точнее задана одна из двух переменных x и p , тем меньше точность, с которой теория позволяет определить другую.

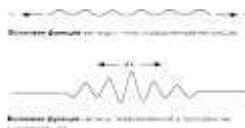


Рис. 4.1. Волновой пакет

Соотношение Гейзенберга могло бы рассматриваться просто как недостаток теории, но, как показали Гейзенберг и Бор, оно соответствует глубокому и ранее не замечавшемуся закону природы: даже в принципе ни один эксперимент не позволит определить величины x и p реальной частицы точнее, чем это допускает соотношение Гейзенберга. Гейзенберг и Бор разошлись в интерпретации этого вывода. Гейзенберг рассматривал его как напоминание о том, что все наши знания по своему происхождению – экспериментальные и что *эксперимент неизбежно вносит в исследуемую систему возмущение*, а Бор рассматривал его как *ограничение точности, с которой само представление о волне и частице применимо к миру атома*.

Гораздо более широким оказывается спектр мнений о природе самой статистической неопределенности. В этих неопределенностях нет ничего нового; они присущи почти каждому измерению, но обычно считают, что они обусловлены недостатками используемых приборов или методов: точное значение существует, однако найти его практически очень трудно, и потому мы рассматриваем полученные результаты как вероятные значения с присущей им статистической неопределенностью. Одна из школ физико-философской мысли, возглавлявшаяся в свое время Эйнштейном, считает, что то же самое имеет место и для микромира, и что квантовая механика с ее статистическими результатами дает лишь средние значения, которые были бы получены при многократном повторении рассматриваемого эксперимента с небольшими различиями из-за несовершенства нашего контроля. При таком воззрении *точная теория каждого отдельного случая в принципе существует, просто она еще не найдена*.

Другая школа, исторически связанная с именем Бора, стоит на том, *что индетерминизм присущ самой природе вещей и что квантовая механика – теория, наилучшим образом описывающая каждый отдельный случай, а в неопределенности физической величины находит отражение та точность, с которой эта величина может определяться и использоваться*. Мнение большинства физиков склонялось в пользу Бора. В 1964 Дж. Белл, работавший тогда в ЦЕРН'е (Женева), показал, что в принципе эту проблему можно решить экспериментально. Результат Белла явился, пожалуй, важнейшим с 1920-х годов сдвигом в поисках физического смысла квантовой механики.

Теорема Белла, как сейчас называют этот результат (см. Приложение 5), утверждает, что некоторые предсказания, сделанные на основе квантовой механики, невозможно воспроизвести путем вычислений на основе какой-либо точной, детерминированной теории с последующим усреднением результатов. Поскольку два таких метода вычислений должны давать разные результаты, появляется возможность экспериментальной проверки. Измерения, выполненные в 1970-х годах, убедительно подтвердили адекватность квантовой механики²⁸.

²⁸ СКРЫТЫЕ ПАРАМЕТРЫ - гипотетич. дополнит. переменные, неизвестные в настоящее время, значения которых должны полностью характеризовать состояние системы и определять её будущее более полно, чем квантовомеханич. вектор состояния. Полагают, что с помощью С. п. от статистич. описания микрообъектов можно перейти к динамич. закономерностям, при которых однозначно свя-

И все же было бы преждевременно утверждать, что эксперимент подвел окончательную черту под дебатами Бора и Эйнштейна, поскольку такого рода проблемы нередко возникают как бы заново, в другом языковом обличье каждый раз, когда, казалось бы, все ответы уже найдены. Как бы то ни было, остаются и другие головоломки, напоминающие нам, что физические теории – это не только уравнения, но и словесные объяснения, связывающие кристальную сферу математики с туманными областями языка и чувственного опыта, и что это зачастую и есть самое трудное.

7.4. Квантовая механика атома²⁹

Недостатки теории Бора, основанной на механике классических частиц с дополнением в виде квантовых постулатов, высветили фундаментальную проблему правильного описания движения электронов на малых расстояниях, например, внутри атома. Опираясь на то, что свет имеет как корпускулярные, так и волновые свойства (в некоторых явлениях, например, при фотоэффекте, он ведет себя как поток частиц, а в некоторых, например, при интерференции, как волна), Л. де Бройль (1892–1987) в 1923 выдвинул гипотезу о том, что корпускулярно-волновой дуализм свойствен также и веществу. Поскольку квантовая теория приписывает световым фотонам при фотоэффекте корпускулярное поведение, можно допустить, что электроны в атомах могут вести себя на своих «орбитах» подобно волнам. Де Бройль пришел к выводу, что с движением лю-

заны во времени сами физ. величины, а не их статистич. распределения. С. п. обычно считаются разл. поля или координаты и импульсы более мелких, составных частей квантовых частиц. Однако после открытия (теоретического) кварков (составных частиц адронов) оказалось, что их поведение подчиняется квантовой механике, как и поведение самих адронов. Согласно теореме фон Неймана, ни одна теория со С. п. не может воспроизвести все следствия квантовой механики, однако, как впоследствии выяснилось, доказательство Дж. фон Неймана (J. von Neumann) было основано на предположениях, вообще говоря, необязательных для любой модели С. п. Весомый аргумент в пользу существования С. п. выдвинули А. Эйнштейн (A. Einstein), Б. Подольский (B. Podolsky) и Н. Розен (N. Rosen) в 1935 (т. н. Эйнштейна - Подольского - Розена парадокс), сущность к-рого в том, что нек-рые характеристики квантовых частиц (в частности, проекции спина) можно измерять, не подвергая частицы силовому воздействию. Новым стимулом к эксперим. проверке парадокса Эйнштейна - Подольского - Розена стали доказанные в 1951 Белла неравенства [2], к-рые дали возможность прямой эксперим. проверки гипотезы о С. п. Эти неравенства демонстрируют отличие предсказаний квантовой механики от любых теорий С. п., не допускающих существования физ. процессов, распространяющихся со сверхсветовой скоростью. Поставленные в ряде лабораторий мира эксперименты подтвердили предсказания квантовой механики о существовании более сильных корреляций между частицами, чем предсказывают любые локальные теории С. п. Ведь согласно теориям С. п., результаты эксперимента, проведенного над одной из частиц, определяются только самим этим экспериментом и не зависят от результатов эксперимента, к-рый может проводиться над др. частицей, не связанной с первой силовыми взаимодействиями.

²⁹ ЛИТЕРАТУРА

Вихман Э. *Квантовая физика*. М., 1977

Джеммер М. *Эволюция понятий квантовой механики*. М., 1985

Ельяшевич М.А. *Атом; Атомная физика; Атомные спектры. Физическая энциклопедия*, т. 1. М., 1988

бого вида частиц можно «ассоциировать» распространение волны, если приписать частице с массой m и скоростью v длину волны

$$\lambda = h/mv.$$

Экспериментальным подтверждением волновых свойств частиц явилось открытое в 1927 Клинтон Дэйвиссоном (1881–1958) и Лестером Джермером (1896–1971) явление дифракции электронов. Угловое распределение электронов при отражении пучка электронов от поверхности кристалла можно объяснить лишь на основе волновых представлений, причем наблюдалось согласие с постулированным де Бройлем соотношением между длиной волны и скоростью.

Разработка квантовой механики В. Гейзенбергом (1901–1976), Э. Шрёдингером (1887–1961) и другими теоретиками в период, последовавший за высказанной де Бройлем гипотезой, привела к прояснению ситуации с теорией Бора. Например, в теории Бора условие «стационарных состояний»

$$mv \cdot 2\pi r = nh$$

носило характер произвольного требования. Теперь же оно выступает как требование, чтобы на периодической орбите электрона укладывалось целое число длин волн де Бройля. Разрешенными оказываются именно те орбиты, которые удовлетворяют этому требованию.

При решении волнового уравнения Шрёдингера для атома водорода естественным образом возникают три квантовых числа, обычно обозначаемые символами n , l и m_l . Здесь n – целое число, принимающее любые значения, большие 0, которое называется главным квантовым числом электрона. Оно соответствует числу n , обозначавшему различные боровские орбиты. Число l (орбитальное квантовое число) тоже целое и может принимать любые значения от 0 до $(n - 1)$. Оно характеризует орбитальный момент импульса электрона и тесно связано с n_φ в модели Бора. Из решения волнового уравнения следует, что разрешены только значения орбитального момента импульса электрона, равные:

$$p_\varphi = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi}.$$

При $n = 1$ максимально допустимое значение l равно нулю, и, следовательно, орбитальный момент импульса электрона тоже должен быть равен нулю.

Третье квантовое число m_l называется «магнитным квантовым числом» и играет важную роль, когда атом находится в магнитном поле H . В этом случае квантуется не только орбитальный момент импульса p_φ , но и его проекция на

направление магнитного поля. Проекция квантового числа l на направление поля H также должна быть целым числом, m_l . Таким образом, m_l может принимать $(2l + 1)$ значений: $+l, (l - 1), (l - 2), \dots, -(l - 1), -l$. В рамках модели Бора это соответствует заданию угла Θ наклона плоскости электронной орбиты относительно направления магнитного поля, как показано на рис. 4.2:

$$\cos \Theta = m_l/l.$$

Если $l = 3$, то существует $(2l + 1)$, т.е. 7 различных дискретных значений угла, которые могут составлять боровские орбиты с направлением H (рис. 9,б).

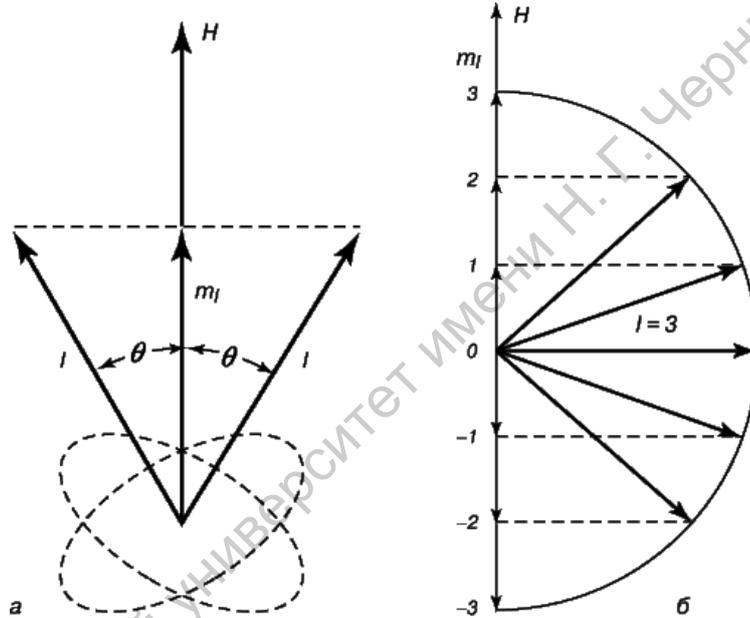


Рис. 4.2. Квантовые числа согласно волновой механике Шрёдингера. *a* – квантовое число l характеризует орбитальный момент импульса электрона; магнитным квантовым числом m_l наряду с l определяется угол Θ , под которым электронная орбита наклонена к направлению магнитного поля H . *б* – при $l = 3$ квантовое число m_l принимает $(2l + 1)$ возможных значений, в данном случае 7.

Еще одно следствие правил квантования m_l состоит в том, что магнитный момент μ может принимать значения

$$\mu = leh/4\pi mc = l\mu_0,$$

где величина, так называемый магнетон Бора, равна $9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл. Изменение энергии электрона, обусловленное взаимодействием его момента с магнитным полем, равно:

$$\Delta E = \mu_0 H m_l.$$

Таким образом, магнитное поле приводит к расщеплению уровней и увеличению числа переходов и спектральных линий, т.е. к эффекту Зеемана.

7.5. Принцип запрета Паули. Периодическая система элементов. Твердое тело

В то время, когда формировались идеи квантовой механики, для объяснения характеристик линейчатых спектров атомов была выдвинута гипотеза спина электрона. Спектроскопия более высокого разрешения показала, что многие линии представляют собой дублеты, которые не удастся объяснить, исходя из орбитального движения электронов. Особенно показательный пример – дублет желтых линий натрия 589,0 и 589,6 нм, который четко разделяется даже простыми спектрометрическими приборами.

Для объяснения частого появления дублетов в линейчатых спектрах Дж. Уленбек (1900–1988) и С. Гаудсмит (1902–1978) выдвинули в 1925 предположение, что электрон имеет собственный момент импульса, или спин, т.е. его можно представить себе вращающимся вокруг собственной оси одновременно с вращением по орбите вокруг ядра, аналогично вращению Земли при ее движении вокруг Солнца. Спин характеризуется еще одним квантовым числом, s . Поскольку вектор спинового момента импульса имеет $(2s + 1)$ различных ориентаций, а наблюдаемая кратность энергетических уровней равна двум, имеем $(2s + 1) = 2$, или $s = 1/2$. Проекция вектора s на некое выделенное направление (направление внешнего магнитного поля) характеризуется спиновым магнитным квантовым числом m_s , которое может быть равно либо $+1/2$, либо $-1/2$. Вращающийся вокруг собственной оси электрон подобен крошечному магниту с магнитным моментом

$$\mu_s = \frac{eh}{4\pi mc}$$

В конечном итоге получается 4 независимых квантовых числа, характеризующих состояние электрона в атоме: n – главное квантовое число; l – орбитальное квантовое число; m_l – орбитальное магнитное квантовое число; m_s – спиновое магнитное квантовое число.

Хотя квантовая механика позволяет, если заданы квантовые числа, определить энергию состояния и пространственное распределение электронной плотности вероятностей (заменяющее орбиты в модели Бора), для фиксации числа электронов в каждом состоянии требуются дальнейшие предположения.

В 1925 **В. Паули** (1900–1958) сформулировал «принцип запрета», который сразу внес ясность в очень многие атомные явления. Он предложил простое правило: *в каждом отдельном квантовом состоянии может находиться только один электрон*. Это означает, что набор чисел, отвечающих данным n , l и m_l , зависит от n . Например, при $n = 1$ возможно лишь $l = 0$; следовательно, $m_l = 0$ и единственное различие состояний связано с $m_s = +1/2$ и $-1/2$. В таблице приведены возможности, отвечающие различным n . Отметим, что в первой «оболочке» ($n = 1$) имеются 2 электрона, в следующей оболочке ($n = 2$) имеется 8 электронов, образующих две подоболочки, и т.д. Максимальное число электронов в подоболочке равно $2(2l + 1)$, а максимальное число подболо-

чек составляет n . Для каждого n полностью заполненная оболочка содержит $2n^2$ электронов.

Таблица 4.1. ВОЗМОЖНОЕ ЧИСЛО ЭЛЕКТРОНОВ В ДАННОЙ ОБОЛОЧКЕ					
n	l	m_l	m_s	Число электронов в подоболочке	Число электронов в заполненной оболочке
1	0	0	+1/2	2	2
1	0	0	-1/2		
2	0	0	+1/2	2	
2	0	0	-1/2		
2	1	-1	+1/2	6	8
2	1	-1	-1/2		
2	1	0	+1/2		
2	1	0	-1/2		
2	1	1	+1/2		
2	1	1	-1/2		
3	0	0	+1/2	2	
3	0	0	-1/2		
3	1	-1	+1/2	6	
3	1	-1	-1/2		
3	1	0	+1/2		
3	1	0	-1/2		
3	1	1	+1/2		
3	1	1	-1/2		
3	2	-2	+1/2	10	18
3	2	-2	-1/2		
3	2	-1	+1/2		
3	2	-1	-1/2		
3	2	0	+1/2		
3	2	0	-1/2		
3	2	1	+1/2		
3	2	1	-1/2		
3	2	2	+1/2		
3	2	2	-1/2		

Соответствие принципа Паули эксперименту было подтверждено огромным числом спектроскопических наблюдений, а также многочисленными данными электронной теории металлов, физики ядерных процессов, низкотемпературных явлений. Это один из наиболее фундаментальных объединяющих принципов физики, открывший путь к пониманию электронной структуры сложных атомов. Правда, принципом Паули определяется лишь возможность заполнения различных электронных оболочек, а для проверки фактического заполнения тех или иных состояний необходимы данные, полученные на основе оптических и рентгеновских спектров. Но в атомах вплоть до аргона с $Z = 18$ каждый дополнительный электрон просто добавляется в низшую из незаполненных подоболочек. Отступления от этого порядка наблюдаются у более сложных атомов, оболочки которых частично перекрываются. Квантовая механика объясняет это отступление тем, что в первую очередь заполняются состояния с самой низкой энергией.

Детальный анализ электронной структуры и распределения электронов с точки зрения квантовой механики и принципа Паули в более тяжелых атомах весьма сложен. Для состояния $1s$ ($n = 1, l = 0$) возможно только сферически симметричное распределение (причем наиболее вероятным оказывается положение электрона в центре атома). В состоянии $2p$ ($n = 2, l = 1$) момент импульса электрона уже не равен нулю, и поэтому максимум плотности находится на ненулевом расстоянии от ядра. Распределение электронной плотности зависит от квантового числа m_l в соответствии с требованием квантования компонент момента импульса вдоль направления магнитного поля.

Периодическая система элементов. Число электронов, находящихся в оболочках нейтрального атома, равное числу протонов в его ядре, называется атомным номером элемента. Периодическая система элементов, предложенная в 1869 Д.И. Менделеевым (1834–1907) – это таблица, в которой элементы располагаются в порядке возрастания атомного номера и распределяются по периодам так, что атомы со сходными химическими свойствами попадают в одну и ту же группу. Например, группа, содержащая гелий, неон, аргон, криптон, ксенон и радон, составляет группу инертных газов; это атомы с заполненными электронными оболочками, а из заполненной оболочки почти так же трудно удалить электрон, как и добавить в нее лишний. Кроме того, эти газы – одноатомные, их молекулы представляют собой один атом.

Химические свойства атомов в значительной степени определяются внешними электронами. Простой характер таблицы вплоть до аргона (атомный номер которого $Z = 18$) обусловлен тем, что при добавлении очередного электрона вплоть до $Z = 18$ последовательно заполняется низшая подоболочка. Значительное же усложнение таблицы после $Z = 18$ объясняется усложнением последовательности заполнения подоболочек. Для случая, когда имеется большое число электронов, точные решения уравнений квантовой механики получить не удастся, и используются приближенные методы. Одно из приближений состоит в том, что атом с единственным электроном сверх заполненной оболочки, такой, как натрий, $Z = 11$, рассматривается как «одноэлектронный» атом. И действительно, упрощенная теория Бора (модифицированная с учетом значения $n = 3$ для состояния электрона) дает довольно точные значения для энергии уровней (но не для расщепления линий).

Дальнейшее исследование структуры атомов. В настоящее время электронная структура атомов в принципе получила свое объяснение, хотя свойства многоэлектронных атомов удастся рассчитать лишь приближенно. Квантовая механика объясняет все известные свойства отдельных атомов. Активно изучается взаимодействие атомов, особенно в твердых телах.

7.6. Почему синий свет преломляется сильнее, чем красный? Пример применения квантовой механики и теории электромагнетизма

**Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом.
Оптический диапазон.**

Рассмотрим конкретный пример, который требует выяснения причин. Известно, что в прозрачной призме свет преломляется неодинаково: фиолетовый и синий сильнее, чем красный. В чем причина этого явления, которое люди наблюдают уже многие тысячелетия в виде радуги и других примеров разложения видимого света на цветовые лучи?

Закон преломления света известен (Снеллиус, Декарт):

$$\frac{\sin \varphi'}{\sin \varphi''} = \frac{n_2}{n_1},$$

где φ' - угол падения, а φ'' - угол преломления луча;

n_1 и n_2 - показатели преломления соответствующих сред.

Запишем известные соотношения:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu\varepsilon}$$

$$\lambda = \frac{1}{n} \cdot \frac{c}{\nu} = \frac{1}{n} \lambda (\text{вакуум}),$$

$$k = n \frac{\omega}{c} = nk (\text{вакуум}).$$

Здесь c - скорость света в среде, λ - длина волны, а ν - скорость света в вакууме, k - волновое число, ε - относительная диэлектрическая, а μ - магнитная проницаемость среды.

Предполагается, что среда не может изменить частоту вынуждающей силы, а меняет длину волны. В стекле $n = 1,5$, поэтому число волн на единицу длины $1/\lambda$ в стекле в 1,5 раза больше, чем в вакууме.

Таблица 4.2. Дисперсия показателя преломления стекла.

Цвет	λ , Å	λ , мкм	$\nu * 10^{-14}$ Гц	n
Ближний УФ	3610	0,361	8,31	1,539
Темно-голубой	4340	0,434	6,92	1,528
Желтый	5890	0,589	5,10	1,517
Темно-красный	7680	0,768	3,91	1,511
ИК	12000	1,20	2,50	1,505
Дальний ИК	20000	2,00	1,50	1,497

В таблице приведены данные для стекла «цинковый крон» из справочника по физике. Дисперсия такова, что n увеличивается на 0,06 на каждые 1000 Å уменьшения длины волны.

Почему n меняется с частотой?

Рассмотрим простую модель «молекулы стекла». Хотя квантово-механическое описание является единственно правильным, кое-что может прояснить и классический (электромагнитный) подход.

Любое вещество имеет полосы резонанса с излучением, природа которых носит квантовый характер. Однако экспериментально наблюдать их мы можем вне зависимости от характера теории. Для стекла (неокрашенного) эти полосы лежат в УФ области спектра. Поэтому стекло и прозрачно в видимой области.

Рассмотрение устройства «молекулы» как совокупности гармонических осцилляторов (электронов), прикрепленных к ядру «пружиной» дает

$$n^2 = \varepsilon = 1 + \frac{4\pi Nq^2}{M} \cdot \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (2.12)$$

где M – масса, а N – число осциллирующих частиц, q – заряд осциллятора, ω_0 – круговая частота резонансного поглощения, ω – текущая круговая частота.

Число осцилляторов в формуле (2.12) N равно числу электронов на внешней оболочке атома, т.е. валентных электронов. Длина волны видимого света в среднем в 5 раз больше, чем λ_0 , а частота в 5 раз меньше, чем ω_0 (1000 Å). При возрастании ω растет (см. 2.12) n^2-1 , т.е. n . Поэтому фиолетовый и синий свет должны иметь n больше, чем красный, что находится в согласии с опытом.

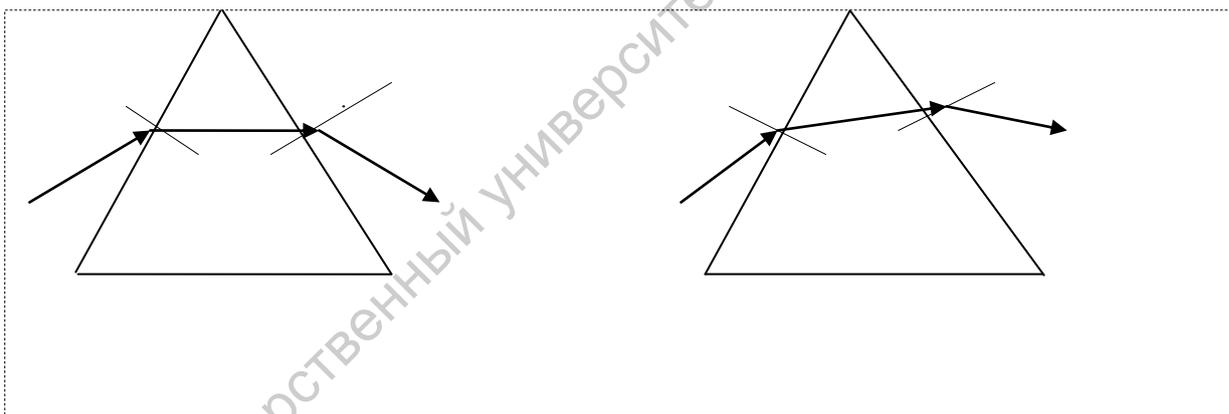


Рис. Преломление луча различной длины волны в прозрачной призме. Слева синий луч (показатель преломления n_1), справа – красный (n_2 , причем $n_1 > n_2$). Большему показателю преломления соответствует и большее отклонение луча на выходе призмы к ее основанию. Вспомогательными линиями показаны перпендикуляры к соответствующим граням.

Надо сказать, что закон преломления ничего не говорит об интенсивности преломленного света, а она тоже зависит от длины волны.

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha d}, \quad \text{где } \alpha \text{ – показатель поглощения.}$$

Известно, что оптический диапазон стоит в ряду других частот электромагнитного излучения. Но он занимает особое положение, имея наибольшие коэффициенты поглощения электромагнитного излучения (света). Это свидетельствует о более сильном взаимодействии электромагнитного излучения с веществом именно в оптическом и примыкающих к нему диапазонах. Если мы, перейдя к квантовому рассмотрению, оценим энергию фотона, то она составит

1,5 - 3 эВ. Известно, что это диапазон энергии валентных электронов, проявляющийся в физических взаимодействиях и химических реакциях. Т.о., наиболее сильное поглощение и область дисперсии расположены в оптическом и соседним с ним ультрафиолетовом диапазонах. Остальные диапазоны электромагнитного излучения показывают более слабое взаимодействие с веществом. Это, с одной стороны, рентгеновский и γ - диапазон, с другой – тепловые и радиоволны.

Количество электронов, населяющих глубокие оболочки, падает. Следовательно, взаимодействие высокоэнергетичных электромагнитных излучений с веществом падает (по экспоненциальному закону) с ростом энергии кванта. Напротив, мы должны констатировать, что электромагнитное излучение больших длин волн находится вне области резонансного взаимодействия. Поэтому радиоизлучение слабо поглощается веществом, имеющим связанные электроны (диэлектрик) и сильно поглощается проводниками, особенно металлами, которыми оно еще и сильно отражается. Соответствующие формулы для коэффициента поглощения и отражения имеются еще со времен Лоренца.

Таким образом, при объяснении спектральной зависимости преломления света мы пришли к необходимости квантово-механического подхода, отвечающего за природу ω_0 , который чувствовал еще Ньютон, но который стал возможен не в XVIII, а в XX в.

Резюме: Взаимодействие электромагнитного излучения со средой с точки зрения теории Максвелла описывается некоторыми основными закономерностями, которые в оптическом диапазоне дополняются резонансным поглощением, определяемым квантовыми закономерностями. Коротковолновое (рентгеновское и гамма) излучение имеет меньший коэффициент поглощения в среде, определяемый квантовым строением среды (электронные уровни энергии). Взаимодействие с длинноволновым излучением (например, радиодиапазона) может быть рассмотрено в классическом (максвелловском) подходе и определяется в значительной степени наличием свободных и связанных зарядов (электронов). Самое большое поглощение может находиться в ультрафиолетовом (где расположена ω_0) или видимом диапазонах частот. Это положение полосы сильного оптического поглощения может дать только квантово-механическое рассмотрение (зонная теория твердого тела), дополненное анализом электронов в твердом теле как осцилляторов с позиции электродинамики Максвелла. Такой комплексный подход необходим потому, что речь идет о поведении связанных электронов.

8. Атомное ядро³⁰

Ядро представляет собой центральную часть атома. В нем сосредоточены положительный электрический заряд и основная часть массы атома; по сравнению с радиусом электронных орбит размеры ядра малы: 10^{-15} – 10^{-14} м. Ядра всех атомов состоят из протонов и нейтронов, имеющих почти одинаковую массу, но лишь протон несет электрический заряд. Полное число протонов совпадает с атомным номером Z атома, который в свою очередь равен числу электронов в нейтральном атоме. Ядерные частицы (протоны и нейтроны), называемые нуклонами, удерживаются вместе очень большими силами; по своей природе эти силы не могут быть ни электрическими, ни гравитационными, а по величине они на много порядков превышают силы, связывающие электроны с ядром.

8.1. История открытий

Первое представление об истинных размерах ядра давали опыты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц в тонких металлических фольгах. Частицы глубоко проникали сквозь электронные оболочки и отклонялись, приближаясь к заряженному ядру. Эти опыты явно свидетельствовали о малых размерах центрального ядра и указали на способ определения ядерного заряда. Резерфорд установил, что альфа-частицы приближаются к центру положительного заряда на расстояние примерно 10^{-14} м, а это позволило ему сделать вывод, что таков максимально возможный радиус ядра.

На основе таких предположений Бор построил свою квантовую теорию атома, успешно объяснившую дискретные спектральные линии, фотоэффект, рентгеновское излучение и периодическую систему элементов. Однако в теории Бора ядро рассматривалось как положительный точечный заряд.

Ядра большинства атомов оказались не только очень малы – на них никак не действовали такие средства возбуждения оптических явлений, как дуговой искровой разряд, пламя и т.п. Указанием на наличие некой внутренней структуры ядра явилось открытие в 1896 А.Беккерелем радиоактивности. Оказалось, что уран, а затем и радий, полоний, радон и т.п. испускают не только коротковолновое электромагнитное излучение, рентгеновское излучение и электроны (бета-лучи), но и более тяжелые частицы (альфа-лучи), а они могли исходить лишь из массивной части атома. Резерфорд использовал альфа-частицы радия в своих опытах по рассеянию, которые послужили основой формирования представлений о ядерном атоме. (В то время было известно, что альфа-частицы – это атомы гелия, лишенные своих электронов; но на вопрос – почему некоторые тяжелые атомы спонтанно испускают их, ответа еще не было, как не было и точного представления о размерах ядра.)

Открытие изотопов. Измерения масс «каналовых лучей», проведенные Джозефом Томсоном, Френсисом Астоном и другими исследователями с по-

³⁰ ЛИТЕРАТУРА: Айзенбуд Л., Вигнер Е. *Структура ядра*. М., 1959. Престон М. *Физика ядра*. М., 1964. Кук Ш. *Структура атомных ядер*. М., 1967. Лейн А. *Теория ядра*. М., 1967. Федянин В. К. *Электромагнитная структура ядер и нуклонов*. М., 1967. Широков Ю.М., Юдин Н.П. *Ядерная физика*. М., 1980. Робертсон Б. *Современная физика в прикладных науках*. М., 1985

мощью более совершенных масс-спектрометров и с большей точностью, дали ключ к строению ядра, а также атома в целом. Например, измерение отношения заряда к массе показало, что заряд ядра водорода, по-видимому, представляет собой единичный положительный заряд, численно равный заряду электрона, а масса $m_p = 1837m_e$, где m_e – масса электрона. Гелий мог давать ионы с двойным зарядом, но его масса в 4 раза превышала массу водорода. Таким образом, высказанная ранее В. Праутом гипотеза о том, что все атомы построены из атомов водорода, была серьезно поколеблена.

Сравнивая на своем масс-спектрографе массу атома неона с известными массами других элементов, Томсон в 1912 неожиданно обнаружил, что неону вместо одной соответствуют две параболы. Расчеты масс частиц показали, что одна из парабол отвечает частицам с массой 20, а другая – с массой 22. Это явилось первым свидетельством того, что атомы определенного химического элемента могут иметь различные массовые числа. Поскольку измеренное (среднее) массовое число оказалось равным 20,2, Томсон высказал предположение, что неон состоит из атомов двух типов, на 90% с массой 20 и на 10% с массой 22. Поскольку оба типа атомов в природе существуют в виде смеси и их нельзя разделить химическим путем, массовое число неона оказывается равным 20,2.

Наличие двух типов атомов неона наводило на мысль о том, что и другие элементы могут представлять собой смеси атомов. Последующие масс-спектрометрические измерения показали, что большинство природных элементов представляют собой смеси от двух до десяти различных сортов атомов. Атомы одного и того же элемента с различной массой называют изотопами. У некоторых элементов существует только *один изотоп*, что требовало теоретического объяснения, как и *факт разной распространенности элементов*, а также *существование радиоактивности лишь у определенных веществ*.

В связи с открытием изотопов возникла проблема стандартизации, поскольку химики ранее выбрали в качестве стандарта «кислород» (16,000000 атомных единиц массы), оказавшийся смесью четырех изотопов. В итоге было решено установить «физическую» шкалу масс, в которой наиболее распространенному изотопу кислорода приписывалось значение 16,000000 а.е.м. Однако в 1961 между химиками и физиками было достигнуто соглашение, согласно которому наиболее распространенному изотопу углерод-12 были приписаны 12,000000 а.е.м. Поскольку число атомов в 1 моле изотопа равно числу Авогадро N_0 , получаем

$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{N_0} = \frac{1}{6,025 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Отметим, что в атомную единицу массы входит масса одного электрона, а масса самого легкого изотопа водорода почти на 1% больше 1 а.е.м.

Открытие нейтрона. Открытие изотопов не прояснило вопрос о строении ядра. К этому времени были известны лишь протоны – ядра водорода и электроны, а потому естественной была попытка объяснить существование изотопов различными комбинациями этих положительно и отрицательно заряжен-

ных частиц. Можно было бы думать, что ядра содержат A протонов, где A – массовое число, и $\tilde{A}Z$ электронов. При этом полный положительный заряд совпадает с атомным номером Z .

Такая простая картина однородного ядра поначалу не противоречила выводу о малых размерах ядра, вытекавшему из опытов Резерфорда. «Естественный радиус» электрона $r_0 = e^2/mc^2$ (который получается, если приравнять электростатическую энергию e^2/r_0 заряда, распределенного по сферической оболочке, собственной энергии электрона mc^2) составляет $r_0 = 2,82 \cdot 10^{-15}$ м. Такой электрон достаточно мал, чтобы находиться внутри ядра радиусом 10^{-14} м, хотя поместить туда большое число частиц было бы затруднительно. В 1920 Резерфорд и другие ученые рассматривали возможность существования устойчивой комбинации из протона и электрона, воспроизводящей нейтральную частицу с массой, приблизительно равной массе протона. Однако из-за отсутствия электрического заряда такие частицы с трудом поддавались бы обнаружению. Вряд ли они могли бы и выбивать электроны из металлических поверхностей, как электромагнитные волны при фотоэффекте.

Лишь спустя десятилетие, после того как естественная радиоактивность была глубоко исследована, а радиоактивное излучение стали широко применять, чтобы вызывать искусственное превращение атомов, было надежно установлено существование новой составной части ядра. В 1930 В. Боте и Г. Беккер из Гисенского университета проводили облучение лития и бериллия альфа-частицами и с помощью счетчика Гейгера регистрировали возникающее при этом проникающее излучение. Поскольку на это излучение не оказывали влияния электрические и магнитные поля и оно обладало большой проникающей способностью, авторы пришли к выводу, что испускается жесткое гамма-излучение. В 1932 Ф. Жолио и И. Кюри повторили опыты с бериллием, пропускавая такое проникающее излучение через парафиновый блок. Они обнаружили, что из парафина выходят протоны с необычно высокой энергией, и заключили, что, проходя через парафин, гамма-излучение в результате рассеяния порождает протоны. (В 1923 было установлено, что рентгеновские лучи рассеиваются на электронах, давая комптоновский эффект).

Дж. Чедвик повторил эксперимент. Он также использовал парафин и ионизационную камеру (рис. 4.3), в которой собирался заряд, возникающий при выбивании электронов из атомов, измерял пробег протонов отдачи.

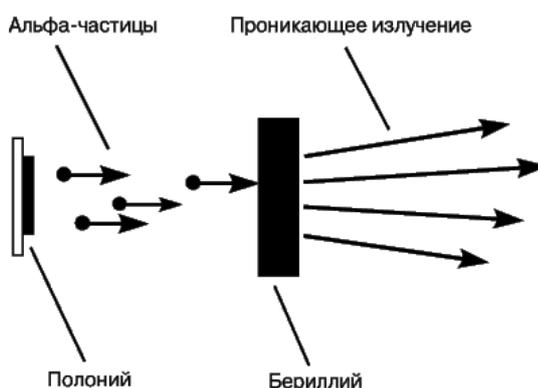
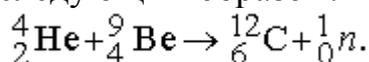


Рис. 4.3. Эксперимент Чедвика. Схема процесса, в котором был открыт нейтрон

Чедвик использовал также газообразный азот (в камере Вильсона, где вдоль следа заряженной частицы происходит конденсация водяных капелек) для поглощения излучения и измерения пробега атомов отдачи азота. Применив к результатам обоих экспериментов законы сохранения энергии и импульса, он пришел к выводу, что обнаруженное нейтральное излучение – это не гамма-излучение, а поток частиц с массой, близкой к массе протона. Чедвик показал также, что известные источники гамма-излучения не выбивают протонов.

Тем самым было подтверждено существование новой частицы, которую теперь называют нейтроном. Расщепление металлического бериллия происходило следующим образом:



Альфа-частицы ${}^4_2\text{He}$ (заряд 2, массовое число 4) сталкивались с ядрами бериллия (заряд 4, массовое число 9), в результате чего возникали углерод и нейтрон.

Открытие нейтрона явилось важным шагом вперед. Наблюдаемые характеристики ядер теперь можно было интерпретировать, рассматривая нейтроны и протоны как составные части ядер. На рис. 4.4 схематически показана структура нескольких легких ядер.

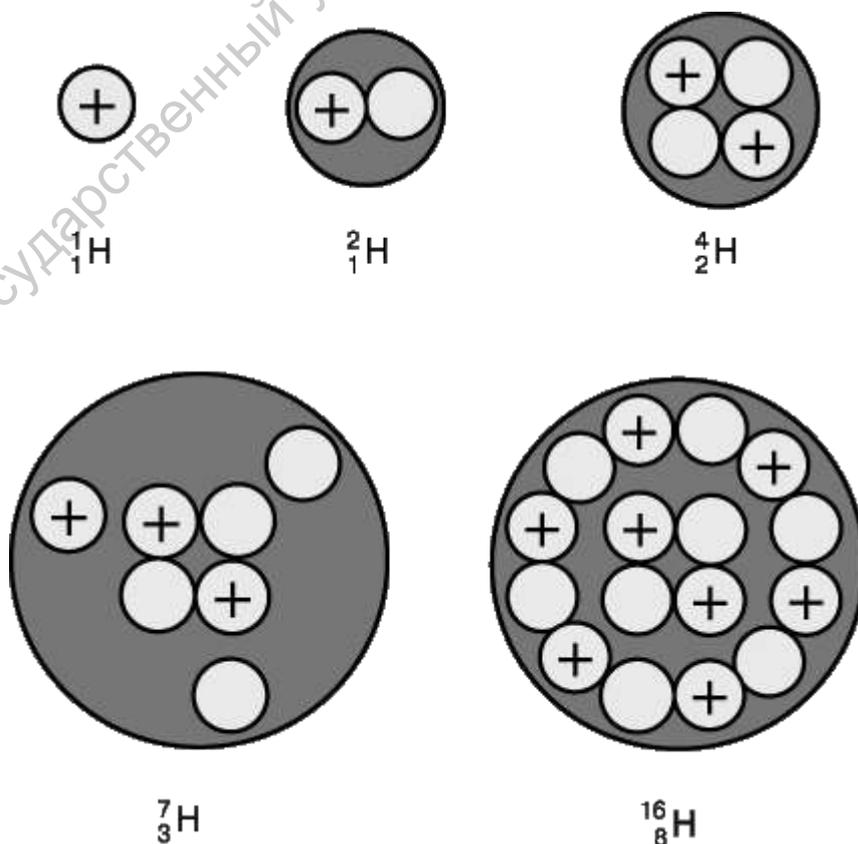


Рис. 4.4. Схема структуры пяти легких ядер

Нейтрон, как теперь известно, на 0,1% тяжелее протона. Свободные нейтроны (вне ядра) претерпевают радиоактивный распад, превращаясь в протон и электрон. Это напоминает о первоначальной гипотезе составной нейтральной частицы. Однако внутри стабильного ядра нейтроны связаны с протонами и самопроизвольно не распадаются.

Ядерная связь. Первоначальное предположение Праута о том, что все атомные массы должны быть целыми кратными массы атома водорода, очень близко к истине, в частности, применительно к изотопам. Отклонения крайне малы, всегда не более 1%, а в большинстве случаев не более 0,1%. Детальное изучение масс изотопов доведено до высочайшей степени совершенства: погрешность измерения в настоящее время, как правило, не превышает нескольких миллионных.

Установлено, что число нейтронов примерно совпадает с числом протонов в атоме, т.е.

$$N = A - Z \approx Z, \quad Z \approx \frac{1}{2}A.$$

В действительности в более тяжелых ядрах имеется некоторый избыток нейтронов. Поскольку нейтрон не заряжен, силы, удерживающие нейтроны и протоны в ядре, по своей природе не являются электростатическими; кроме того, одноименные заряды отталкиваются. То обстоятельство, что ядра очень трудно расщепить, указывает на существование больших сил ядерного притяжения. Несмотря на малость расстояний, гравитационное притяжение между нуклонами все же слишком слабо, чтобы обеспечить стабильность ядра.

Согласно Эйнштейну, полная энергия изолированной системы сохраняется, а масса является одной из форм энергии: $E = mc^2$. Чтобы расщепить такую связанную систему, как ядро стабильного атома, на составляющие ее нейтроны и протоны, ей необходимо сообщить энергию. Это означает, что масса нейтронов и протонов превышает массу ядра на величину

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_{A,Z},$$

где M_p и M_n – массы свободного протона и нейтрона, а $M_{A,Z}$ – масса ядра с зарядом Z и массовым числом A . Эта разница масс, выраженная в единицах энергии, называется энергией связи. Коэффициент для пересчета таков:

$$1 \text{ а.е.м.} = 931,14 \text{ МэВ},$$

где $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$. Таким образом, энергия связи $E_B = \Delta Mc^2$ есть энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нейтроны и протоны.

Средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон, E_B/A , довольно регулярно изменяется с увеличением числа нуклонов в ядре (рис. 3). Самым легким ядром после протона является дейтрон ${}^2_1\text{H}$, расщепление которого требует энергии 2,2 МэВ, т.е. 1,1 МэВ на нуклон. Альфа-частица ${}^4_2\text{He}$ связана гораздо сильнее, чем ее соседи: ее энергия связи составляет 28 МэВ. У ядер с массовым числом, превышающим 20, средняя энергия связи, приходящаяся на нуклон, остается почти постоянной, равной примерно 8 МэВ.

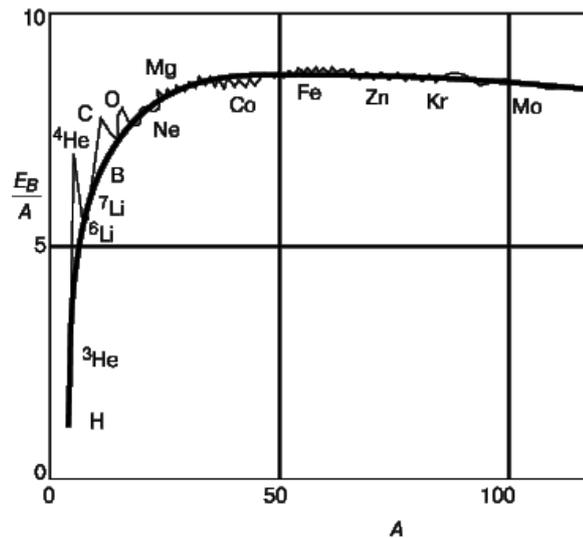


Рис. 4.5. Средняя энергия связи E_B/A , приходящаяся на один нуклон, зависимость от числа нуклонов в ядре A .

Энергия связи ядер на много порядков величины превышает энергию связи валентных электронов в атоме и атомов в молекуле. Чтобы удалить из атома водорода его единственный электрон, достаточно энергии 13,5 эВ; для удаления же внутренних электронов в свинце, связанных наиболее прочно, необходима энергия, равная 0,1 МэВ. Следовательно, все ядерные процессы связаны с энергиями, значительно превышающими те, с которыми мы имеем дело в обычных химических реакциях или при обычных температурах и давлениях.

Естественная радиоактивность. С явления естественной радиоактивности началась ядерная физика. Альфа-, бета- и гамма-излучения, испускаемые ураном, имеют ядерное происхождение, тогда как оптические и рентгеновские спектры соответствуют электронной структуре атома. Альфа-частицы оказались ядрами гелия. Бета-частицы по своему заряду и массе идентичны электронам оболочки атома, однако их ядерное происхождение было четко продемонстрировано изменением заряда распадающегося ядра. Кроме того, энергия гамма-излучения значительно превышает энергию, которую могут излучать электроны из внутренней оболочки атома, следовательно, это проникающее излучение имеет ядерное происхождение.

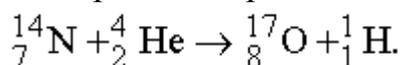
Некоторые встречающиеся в природе элементы с большим атомным номером (уран, торий, актиний) имеют радиоактивные изотопы, в результате распада которых образуются другие радиоактивные изотопы (такие, как радий), а в конечном итоге стабильный свинец. Время жизни «родительского» изотопа в каждом случае сравнимо с возрастом Земли, который оценивается в 10 млрд. лет. Предполагается, что в период образования Земли существовало большое число радиоактивных веществ, однако короткоживущие элементы уже давно превратились в стабильные конечные продукты. Возможно, некоторые из изотопов, которые называют «стабильными», в действительности распадаются, од-

нако их периоды распада («времена жизни») столь велики, что существующими методами их не удастся измерить.

Важная роль радиоактивности в физике ядра связана с тем, что радиоактивное излучение несет информацию о типах частиц и энергетических уровнях ядра. Например, испускание альфа-частиц из ядра и относительная устойчивость образования из двух протонов и двух нейтронов косвенно указывает на возможность существования альфа-частиц внутри ядра.

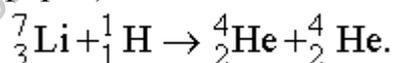
Различие между естественной и искусственно наведенной радиоактивностью не очень существенно для понимания строения ядра, однако изучение естественных радиоактивных рядов позволило сделать важные выводы относительно возраста Земли и использовать такие элементы в качестве источников бомбардирующих частиц задолго до того, как были изобретены ускорители частиц.

Искусственные превращения ядер. Опыты с естественно радиоактивными элементами показали, что на скорость радиоактивного распада нельзя повлиять обычными физическими средствами: теплом, давлением и т.п. Таким образом, поначалу казалось, что нет какого-либо эффективного метода исследования структуры естественно стабильных изотопов. Однако в 1919 Резерфорд обнаружил, что ядра можно расщеплять, бомбардируя их альфа-частицами. Первым расщепленным элементом был азот, который в виде газа заполнял камеру Вильсона. Альфа-частицы, испускаемые ториевым источником, сталкивались с ядрами азота, поглощались ими, в результате чего испускались быстрые протоны. При этом происходила реакция



В результате такой реакции атом азота превращается в атом кислорода. В этом примере энергии связи ядер аналогичны теплу, которое выделяется при химической реакции, хотя и значительно превышают его. Впоследствии аналогичные результаты были получены и со многими другими элементами. Используя различные методы, можно измерить энергии и углы вылета испускаемых заряженных частиц, что обеспечивает проведение количественных экспериментов.

Следующим шагом явилось открытие, сделанное Дж. Кокрофтом и Э. Уолтоном в 1932. Они установили, что искусственно ускоренные пучки протонов с энергией 120 кэВ (т.е. значительно меньшей, чем у альфа-частиц в опытах Резерфорда) способны вызывать расщепление атомов лития в процессе



Два ядра гелия (альфа-частицы) одновременно вылетают в противоположные стороны. Причина, по которой эта реакция протекает при низкой энергии, заключается в прочной связи альфа-частиц; при добавлении протона к массе ядра ${}^7\text{Li}$ сообщается энергия, которая почти равнозначна массам двух альфа-частиц. Остальная энергия, необходимая для протекания реакции, черпается из кинетической энергии бомбардирующих протонов.

Все известные элементы и встречающиеся в природе изотопы могут быть «искусственным» путем превращены в соседние элементы. Все эти новые изотопы оказываются радиоактивными, однако в результате последующего распада они превращаются в стабильные изотопы. Были получены новые элементы, вплоть до элемента с порядковым номером 103; все они оказались радиоактивными с относительно коротким периодом полураспада. В настоящее время известно свыше 1000 изотопов.

8.2. Модели ядра

Энергетические уровни ядер и ядерные модели. Изучение ядерных реакций убедительно продемонстрировало существование энергетических уровней ядер. Эти уровни представляют собой состояния ядра с определенной энергией, которым приписаны определенные квантовые числа, как и энергетическим уровням атома. По аналогии с оптической спектроскопией исследование излучений, испускаемых ядром при переходах между энергетическими уровнями, называется ядерной спектроскопией. Однако, как можно видеть из рис. 4,11 расстояние между энергетическими уровнями ядер значительно больше, чем между электронными уровнями атомов, а к ядерным излучениям, кроме электромагнитного, относятся также излучения электронов, протонов, альфа-частиц и частиц других типов.

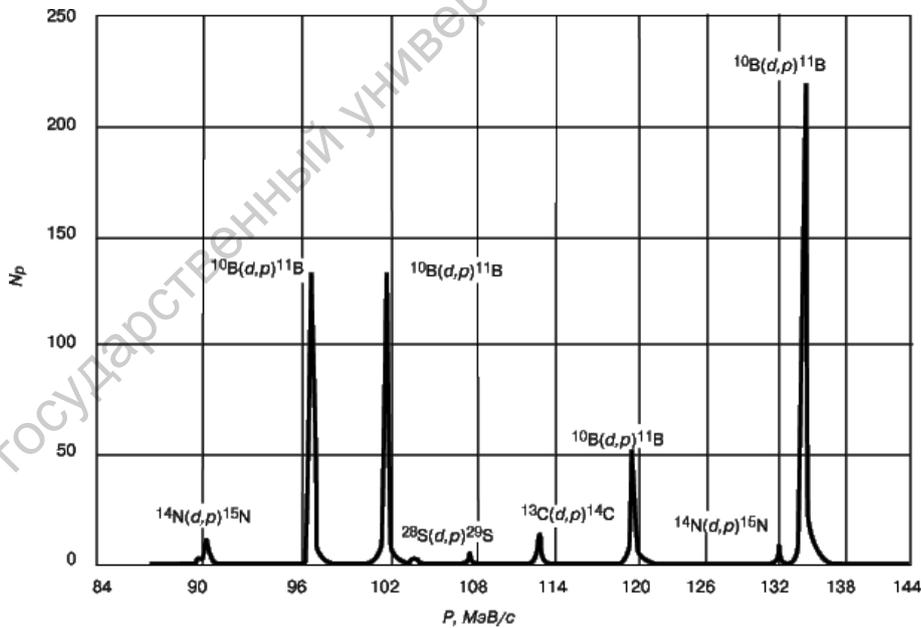
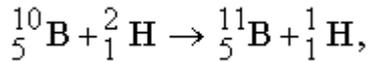


Рис. 4.6. Спектр протонов, возникающих в реакции $^{10}\text{B}(d,p)^{11}\text{B}$. Величина N_p – число протонов, P – импульс протона. Слабые пики отвечают примесям азота, кремния и углерода

О существовании у ядра дискретных энергетических уровней свидетельствует то, что возбуждение ядра, приводящее к испусканию излучения, происходит лишь при определенных энергиях бомбардирующих частиц, а также то, что энергии испускаемых частиц соответствуют переходам между определен-

ными уровнями. Например, можно измерить число протонов, образующихся при бомбардировке бора-10 моноэнергетическими дейтронами в результате реакции



и определить их импульсы по отклонению в магнитном поле. Зарегистрированный спектр протонов из мишени, содержащей бор с примесями углерода, азота и кремния, и представлен на рис. 4.6. Острые, резкие пики ясно показывают, что энергия ядра квантуется подобно энергии атома.

На рис. 4.7 приведена схема энергетических уровней ядра бор-11 (${}^{11}\text{B}$), причем энергии возбуждения выражены в МэВ. Неравномерность распределения ядерных энергетических уровней, не характерная для распределения атомных энергетических уровней, обусловлена более плотной упаковкой ядер и более сильным взаимодействием частиц внутри ядра. С возбужденных уровней, отвечающих ядру ${}^{10}\text{B}$, бомбардируемому дейтронами с энергией 1,51 МэВ, могут происходить переходы на любой из уровней, расположенных ниже, сопровождаемые испусканием протонов. Если после испускания протона ядро ${}^{11}\text{B}$ остается в возбужденном состоянии, оно может затем распадаться, переходя в наинизшее, «основное» состояние с испусканием одного или нескольких гамма-квантов.

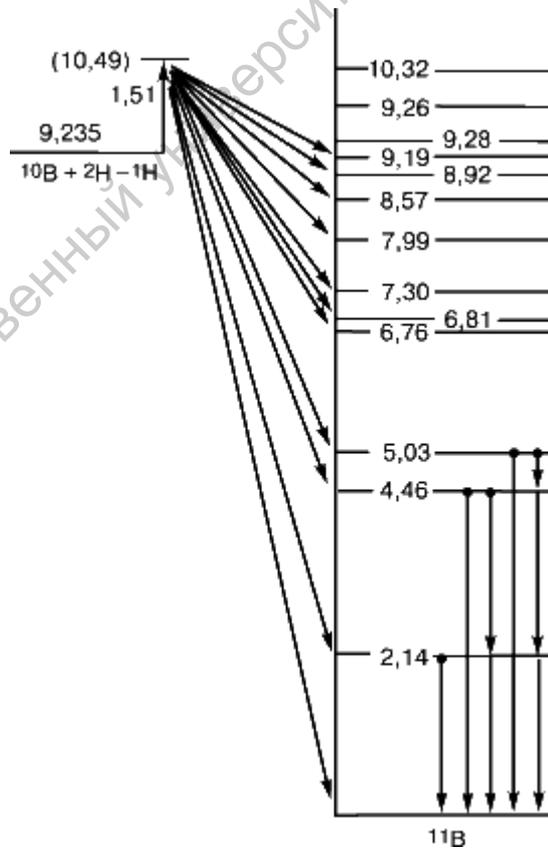


Рис. 4.7. Уровни энергии ядра ${}^{11}\text{B}$. Энергия возбуждения ядра ${}^{11}\text{B}$ выражена в МэВ.

В настоящее время последовательное и единое объяснение причин возникновения энергетических уровней ядер отсутствует, но есть ряд теорий, позволяющих объяснить некоторые явления. Одна из них – «модель оболочек», которая, заимствовав из атомной физики представление об оболочечном строении атома, применила ее к анализу конфигураций нейтронов и протонов внутри ядра.

В 1932 Дж. Бартлетт заметил, что все стабильные ядра, расположенные между ${}^4\text{He}$ и ${}^{16}\text{O}$, относятся к последовательности

$${}^4\text{He} + n + p + n + p + \dots,$$

тогда как между ${}^{16}\text{O}$ и ${}^{36}\text{Ar}$ аналогичная последовательность приобретает вид

$${}^{16}\text{O} + n + n + p + p + n + n + \dots.$$

Он высказал предположение, что эти изменения в последовательности отражают порядок заполнения оболочек нейтронами и протонами. Принцип запрета Паули действует в случае ядерных частиц точно так же, как и в случае электронов, а в модели оболочек он приводит к тому, что на первой оболочке могут находиться только два протона и два нейтрона, на второй – по шести обеих частиц (заполнена у ${}^{16}\text{O}$) и на третьей по десяти (заполнена у ${}^{36}\text{Ar}$). Наличие периодичности в структуре ядер проявляется и дальше, хотя и с некоторыми отступлениями. Существование определенных «магических чисел» (2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126) нейтронов и протонов в ядрах, которым соответствуют пики кривой энергии связи, можно объяснить на основе модифицированной модели оболочек (называемой моделью независимых частиц), которая позволяет правильно предсказывать спины и магнитные моменты ядер. Например, спины ядер с заполненными оболочками, как и предсказывает эта модель, равны нулю. Однако, несмотря на многие достоинства, имеющиеся варианты модели оболочек все же не объясняют всех ядерных явлений, что неудивительно ввиду сложной структуры ядра.

Составное ядро и модель капли. В более тяжелых ядрах число нуклонов настолько велико, что многие наблюдаемые закономерности поведения этих ядер лучше всего воспроизводятся моделью капли. Эту модель предложил в 1936 Н. Бор, чтобы объяснить большие времена жизни возбужденных ядер, образующихся при захвате медленных нейтронов. (В данном случае под временем жизни понимается время с момента возбуждения ядра до момента потери им энергии возбуждения в результате испускания излучения.) Времена жизни оказались в миллион раз больше времени, необходимого нейтрону, чтобы пересечь ядро (10^{-22} с). Это свидетельствует о том, что возбужденное ядро представляет собой некую систему («составное ядро»), время существования которой намного больше времени ее образования.

Бор высказал предположение, что ядерная реакция протекает в две стадии. На первой падающая частица входит в ядро-мишень, образуя «составное ядро», где в многочисленных столкновениях теряет свою первоначальную энергию, распределяя ее среди других нуклонов ядра. В результате ни у одной из частиц не оказывается энергии, необходимой для вылета из ядра. Вторая стадия, распад составного ядра, происходит спустя некоторое время, когда

энергия случайно сконцентрируется на одной из частиц или потеряется в виде гамма-излучения. Считается, что вторая стадия не зависит от деталей механизма образования составного ядра. Вид распада определяется лишь игрой возможных вариантов.

В качестве простой аналогии этой картине ядерной реакции Бор предложил рассмотреть поведение капли. Между молекулами такой капли действуют силы, связывающие их друг с другом и препятствующие испарению, пока не будет подведено тепло извне. Появление еще одной молекулы, обладающей дополнительной кинетической энергией, приводит в результате ее статистического перераспределения к увеличению температуры капли как целого. Спустя некоторое время случайная концентрация энергии на какой-либо молекуле может привести к ее испарению. Теория Бора была детально разработана и позволила построить последовательную картину разнообразных ядерных реакций, в том числе реакций под действием нейтронов и заряженных частиц промежуточных энергий (вплоть до 100 МэВ). Полезными оказались введенные по аналогии понятия ядерной температуры, удельной теплоемкости и испарения частиц. Например, угловое распределение «испарившихся» частиц оказалось не зависящим от направления падающей частицы, т.е. изотропным, поскольку вся информация о первоначальном направлении теряется на стадии существования составного ядра.

Капельная модель оказалась особенно ценной при объяснении явления деления ядер, когда для развала ядра урана на две примерно равные части с большим выделением энергии достаточно поглощения одного медленного нейтрона. Электростатическое отталкивание протонов вызывает некоторую нестабильность ядра, которая обычно перекрывается за счет ядерных сил, обеспечивающих энергию связи. Но при повышении ядерной температуры сферической «капли» в ней могут возникнуть колебания, в результате которых капля деформируется в эллипсоид. Если деформация ядра будет продолжаться, то электростатическое отталкивание двух его положительно заряженных половин может возобладать, и тогда произойдет его деление.

Размеры и форма ядра. Впервые размеры ядра правильно оценил Резерфорд, используя для этой цели рассеяние альфа-частиц. Его первые эксперименты показали, что размеры заряженной части ядра – порядка 10^{-14} м = 10 Фм (Ферми). Более поздние и более точные эксперименты позволили установить, что радиус ядра приблизительно пропорционален $A^{1/3}$ и, следовательно, плотность ядерного вещества почти постоянна. (Она колоссальна: 100 000 т/мм³.)

С открытием нейтрона стало ясно, что он представляет собой идеальное средство исследования ядра, поскольку нейтральные частицы, проходя на значительном удалении от ядра, не испытывают отклонения под действием заряда ядра. Другими словами, нейтрон сталкивается с ядром, если расстояние между их центрами оказывается меньше суммы их радиусов, а в противном случае не отклоняется. Опыты по рассеянию пучка нейтронов показали, что радиус ядра (в предположении сферической формы) равен:

$$R = r_0 A^{1/3},$$

где

$$r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м} = 1,4 \text{ Фм}^{31}$$

Таким образом, радиус ядра урана-238 равен 8,5 Фм. Полученное значение соответствует радиусу действия ядерных сил; оно характеризует расстояние от центра ядра, на котором внешний нейтральный нуклон начинает впервые «ощущать» его воздействие. Такая величина радиуса ядра сравнима с расстоянием от центра ядер, на котором происходит рассеяние альфа-частиц и протонов.

Рассеяние альфа-частиц, протонов и нейтронов на ядрах обусловлено действием ядерных сил; следовательно, такие измерения радиусов ядер дают оценку радиуса действия ядерных сил. Взаимодействие же электронов с ядрами почти полностью определяется электрическими силами. Поэтому рассеяние электронов можно использовать для изучения формы распределения заряда в ядре. Эксперименты с электронами очень высоких энергий, проведенные Р. Хофстедтером в Станфордском университете, дали детальную информацию о распределении положительного заряда по радиусу ядра. На рис. 6 представлено угловое распределение рассеянных ядрами золота электронов с энергией 154 МэВ. Верхняя кривая характеризует угловое распределение, рассчитанное в предположении, что положительный заряд сконцентрирован в точке; очевидно, что экспериментальные данные этому предположению не соответствуют. Гораздо лучшее согласие достигается в предположении о равномерном распределении протонов по объему ядра (нижняя кривая). Однако «радиус заряда» оказывается примерно на 20% меньше радиуса «ядерных сил», полученного на основе данных по рассеянию нейтронов. Это может означать, что распределение протонов в ядре отличается от распределения нейтронов.

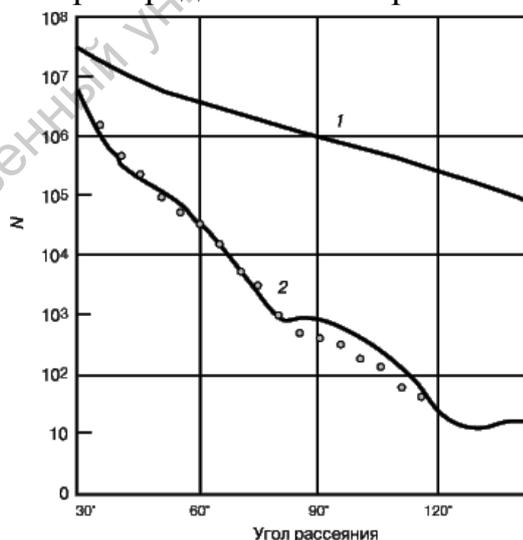


Рис. 4.8. Угловое распределение для рассеяния электронов с энергией 154 МэВ на ядрах золота. N — число рассеянных электронов; 1 — рассеяние на точечном заряде, 2 — рассеяние на равномерно распределенном заряде.

³¹ 1 Фм=1 Ферми= 10^{-15} м.

8.3. Ядерные силы

Малый радиус действия ядерных сил впервые отчетливо обнаружился уже в опытах по рассеянию Резерфорда. Альфа-частицы, приближавшиеся к центру ядра до 10^{-14} м, испытывали действие сил, знак и величина которых отличались от обычного электростатического отталкивания. Более поздние эксперименты с применением нейтронов показали, что между всеми нуклонами существуют большие короткодействующие силы. Эти силы отличны от хорошо известных электростатических и гравитационных сил, не исчезающих даже на очень больших расстояниях. Ядерные силы являются силами притяжения, что прямо следует из факта существования устойчивых ядер, вопреки электростатическому отталкиванию находящихся в них протонов. Ядерные силы между любой парой нуклонов (нейтронов и протонов) – одни и те же; это показывает сравнение энергетических уровней «зеркальных ядер», отличающихся друг от друга тем, что в них протоны заменены нейтронами и наоборот. В пределах своего радиуса действия ядерные силы достигают очень большой величины. Электростатическая потенциальная энергия двух протонов, находящихся на расстоянии $1,5 \cdot 10^{-15}$ м друг от друга, составляет всего лишь 1 МэВ, что в 40 раз меньше ядерной потенциальной энергии. Ядерные силы также обнаруживают насыщение, поскольку данный нуклон в состоянии взаимодействовать лишь с ограниченным числом других нуклонов. Отсюда быстрый первоначальный рост (с увеличением A) средней энергии связи, приходящейся на один нуклон (рис. 3), и относительное постоянство этой энергии в дальнейшем. (Если бы каждый нуклон взаимодействовал со всеми нуклонами в ядре, то энергия связи, приходящаяся на один нуклон, все время росла бы пропорционально A .)

Пока что нет удовлетворительной теории ядерных сил, и проблема интенсивно изучается экспериментально и теоретически. Однако многие идеи, лежащие в основе «мезонной теории ядерных сил», опубликованной в 1935 Х. Юкавой, оказались в согласии с экспериментальными фактами. Юкава выдвинул гипотезу, что притяжение, удерживающее нуклоны внутри ядра, возникает благодаря наличию «квантов» некоего поля, аналогичных фотонам (световым квантам) электромагнитного поля и обеспечивающих взаимодействие электрических зарядов. Из квантовой теории поля следует, что радиус действия силы обратно пропорционален массе соответствующего кванта; в случае электромагнитного поля масса квантов – фотонов – равна нулю, и радиус действия сил бесконечен. Масса *квантов ядерного поля (названных «мезонами»)*, вычисленная по экспериментально измеренному радиусу действия ядерных сил, оказалась примерно в 200 раз больше массы электрона.

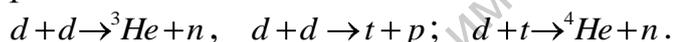
Положение теории Юкавы упрочилось после того, как К. Андерсон и С. Неддермейер открыли в 1936 новую частицу с массой примерно 200 электронных масс (ныне именуемую мюоном), которую они обнаружили с помощью камеры Вильсона в космических лучах. (В 1932 Андерсон открыл «позитрон», положительный электрон.) Вначале казалось, что кванты ядерных сил найдены, однако проведенные затем эксперименты обнаружили обескураживающее обстоятельство: «ключ к ядерным силам» не взаимодействует с ядрами! Эта запу-

танная ситуация прояснилась лишь после того, как в 1947 С. Пауэлл³² обнаружил частицу с подходящей массой, которая взаимодействует с ядрами. Эта частица (названная пи-мезоном, или пионом) оказалась нестабильной и самопроизвольно распадалась, превращаясь в мюон. Пи-мезон подходил на роль частицы Юкавы, и его свойства были во всех деталях изучены физиками, использовавшими для этих целей космические лучи и современные ускорители.

Хотя существование пи-мезонов и ободрило сторонников теории Юкавы, на ее основе оказалось весьма трудно правильно предсказать такие детальные свойства ядерных сил, как их насыщение, энергии связи и энергии ядерных уровней. Трудности математического характера не позволили точно установить, что именно предсказывает эта теория. Ситуация еще более усложнилась после открытия новых типов мезонов, которые, как считается, имеют отношение к ядерным силам

8.4. Техническое применение ядерных реакций

Управляемый термоядерный синтез использует следующие реакции, идущие при температурах $10^7 - 10^8$ К:

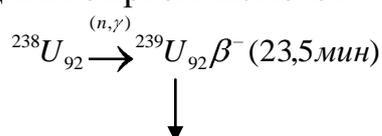


Последняя их обозначенных реакций идет с выделением энергии 17,6 МэВ. Синтез гелия из водорода происходит на Солнце, обеспечивая энергией наше светило. Подобные реакции используются и в водородной бомбе, в которой требуемая высокая температура создается за счет взрыва «запала» - атомной бомбы.

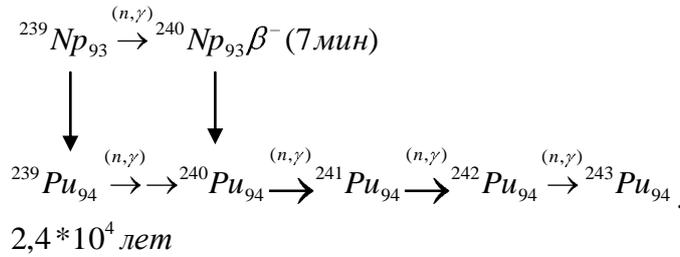
УРАН (лат. Uranium), U (читается «уран»), радиоактивный химический элемент с атомным номером 92, атомная масса 238,0289. Актиноид. Природный уран состоит из смеси трех изотопов: ${}^{238}\text{U}$, 99,2739%, с периодом полураспада $T_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9$ лет, ${}^{235}\text{U}$, 0,7024%, с периодом полураспада $T_{1/2} = 7,13 \cdot 10^8$ лет, ${}^{234}\text{U}$, 0,0057%, с периодом полураспада $T_{1/2} = 2,45 \cdot 10^5$ лет. ${}^{238}\text{U}$ (уран-I, UI) и ${}^{235}\text{U}$ (актиноуран, АсU) являются родоначальниками радиоактивных рядов. Из 11 искусственно полученных радионуклидов с массовыми числами 227-240 долгоживущий ${}^{233}\text{U}$ ($T_{1/2} = 1,62 \cdot 10^5$ лет), он получается при нейтронном облучении тория.

В урановой группе имеется три делящихся изотопа: ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ и ${}^{233}\text{U}$.

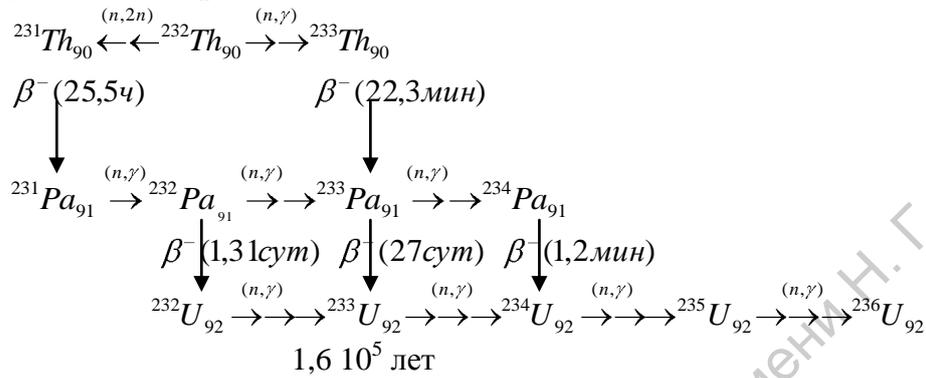
${}^{235}\text{U}$ получается разделением изотопов, ${}^{239}\text{Pu}$ - в реакторах, в которых исходным сырьем является ${}^{238}\text{U}$:



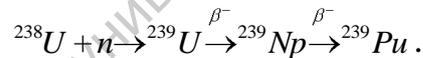
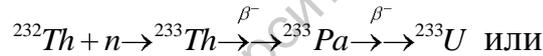
³² Сесил Пауэлл (Powell) (1903-69), английский физик, иностранный член АН СССР (1958). Разработал метод ядерных фотографических эмульсий. Открыл (1947) пи-мезоны в космических лучах. Один из инициаторов создания Европейского центра ядерных исследований. Нобелевская премия (1950). Золотая медаль им. Ломоносова АН СССР (1968).



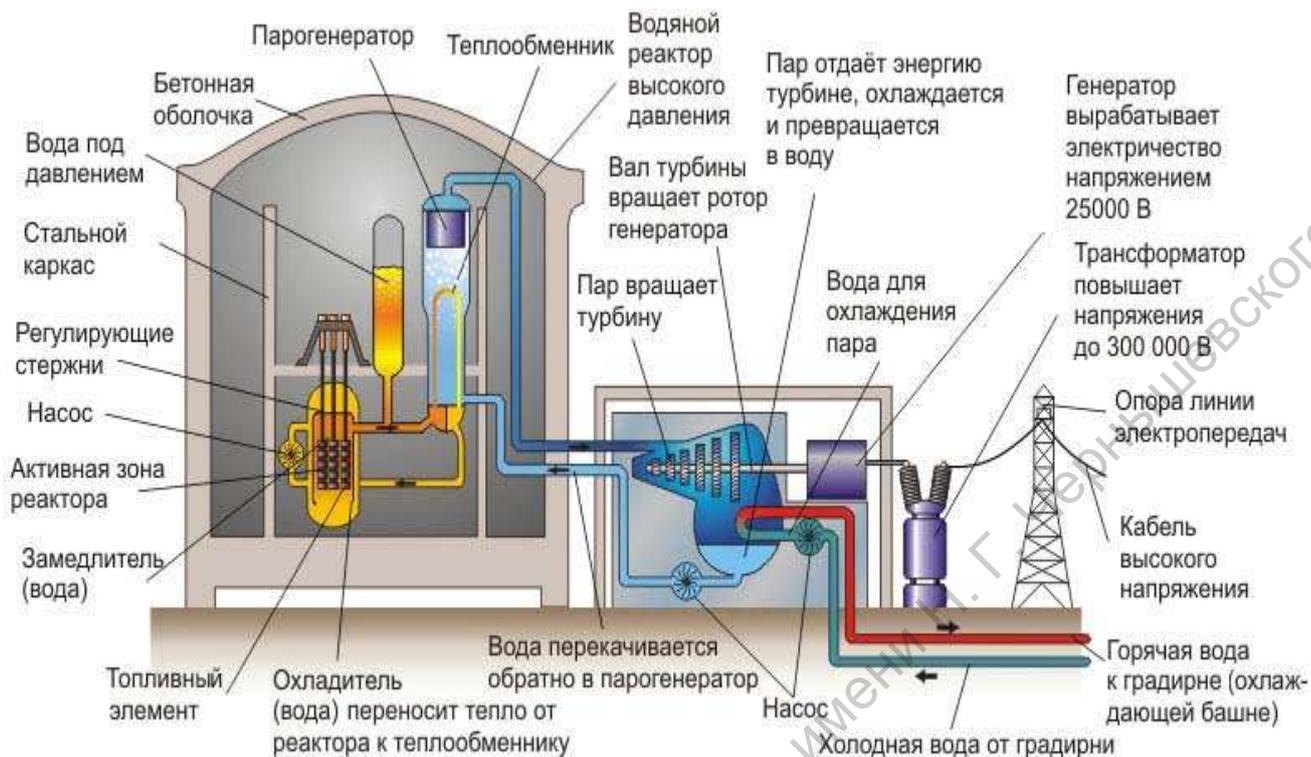
Кроме реакций с участием урана, существует еще группа ядерных реакций с участием тория:



Сокращенная схема выглядит так:



Тепловыделение за счет распада урана-235 осуществляется на атомных электростанциях, одна из которых схематически представлена на рисунке.



© ООО «Кирилл и Мефодий»

Рис. 4.9. Атомная электростанция в разрезе

9. Элементарные частицы³³

По-видимому, еще недавно можно было подумать, что состав материи невероятно прост. Вся видимая материя во Вселенной – на Земле и в космосе – состоит из фундаментальных частиц трех разных видов: электронов и двух типов кварков.

Эти три частицы (как и другие описываемые ниже) взаимно притягиваются и отталкиваются соответственно своим *зарядам*, которых всего четыре вида по числу фундаментальных сил природы. Заряды можно расположить в порядке уменьшения соответствующих сил следующим образом: цветовой заряд (силы взаимодействия между кварками); электрический заряд (электрические и магнитные силы); слабый заряд (силы в некоторых радиоактивных процессах); наконец, масса (силы тяготения, или гравитационного взаимодействия). Слово «цвет» здесь не имеет ничего общего с цветом видимого света; это просто характеристика сильного заряда и самых больших сил.

Заряды *сохраняются*, т.е. заряд, входящий в систему, равен заряду, из нее выходящему. Если суммарный электрический заряд некоторого числа частиц до их взаимодействия равен, скажем, 342 единицам, то он и после взаимодейст-

³³ ЛИТЕРАТУРА: Намбу Е. Кварки: на переднем крае физики элементарных частиц. М., 1984. Окунь Л.Б. *αβγ... Z (элементарное введение в физику элементарных частиц)*. М., 1985

вия независимо от его результата будет равен 342 единицам. Это относится и к другим зарядам: цветовому (заряду сильного взаимодействия), слабому и массовому (массе). Частицы различаются своими зарядами: в сущности, они и «есть» эти заряды. Заряды – это как бы «справка» о праве отвечать на соответствующую силу. Так, только на цветные частицы действуют цветовые силы, только на электрически заряженные частицы действуют электрические силы и т.д. Свойства частицы определяются наибольшей силой, действующей на нее. Только кварки являются носителями всех зарядов и, следовательно, подвержены действию всех сил, среди которых доминирующей является цветовая. Электроны имеют все заряды, кроме цветового, а доминирующей для них является электромагнитная сила.

Наиболее устойчивыми в природе оказываются, как правило, нейтральные комбинации частиц, в которых заряд частиц одного знака компенсируется суммарным зарядом частиц другого знака. Это отвечает минимуму энергии всей системы. (Точно так же два стержневых магнита располагаются в линию, причем северный полюс одного из них обращен к южному полюсу другого, что соответствует минимуму энергии магнитного поля.) Гравитация же является исключением из этого правила: отрицательной массы не существует. Нет тел, которые падали бы вверх.

Следует оговориться, что речь не идет об эквивалентной массе квазичастиц в твердых телах, которая может быть отрицательной (для дырки) и, таким образом, «падать» вверх.

9.1. История и краткий обзор

Элементарные частицы – в точном значении этого слова – первичные, неразложимые частицы, из которых, по предположению, состоит вся материя. Это «первообразные сущности», определяющие все наблюдаемые свойства материального мира, идея, зародившаяся на ранних этапах развития естествознания и всегда игравшая важную роль в его развитии.

Понятие элементарной частицы сформировалось в тесной связи с установлением дискретности характера строения вещества на микроскопическом уровне. Обнаружение на рубеже 19-20 вв. мельчайших носителей свойств вещества – молекул и атомов – и установление того факта, что молекулы состоят из атомов, позволило впервые описать все наблюдаемые свойства вещества. Открытие составных частей самих атомов и ядер позволило уменьшить число «первочастиц» до 3: электрон, протон и нейтрон. Затем к ним добавился и фотон.

Впоследствии убедились в ограниченной применимости к микромиру выражения «состоит из ...».

В современной физике смысл термина «элементарные частицы» менее строгий: это большая группа мельчайших наблюдаемых частиц материи, не являющихся атомами или атомными ядрами, кроме протона, который является ядром атома водорода. Эта группа частиц оказалась весьма обширной. Помимо

4-х указанных, к ней относятся *пи*-мезоны (π), мюоны (μ)³⁴, *тау*-лептоны (τ), нейтрино трех видов (ν_e, ν_μ, ν_τ), т.н. странные частицы (K-мезоны и гипероны), очарованные частицы и красивые (прелестные) частицы (D- и B-мезоны и соответствующие барионы), разнообразные резонансы, в т.ч. мезоны со скрытым очарованием и прелестью (*пси*-частицы и *ипсилон*-частицы) и, наконец, открытые в начале 80-х гг. промежуточные векторные бозоны (W, Z) – всего более 350 частиц, в основном нестабильных. Число элементарных частиц непрерывно растет.

Электрон был открыт Д. Томсоном (1897), затем Резерфорд в 1911 г. показал, что заряд сосредоточен в компактных областях – ядрах, а в 1919 г. он обнаружил среди частиц, вылетающих из ядра, протон. Нейтрон был открыт Чедвиком в 1932 г. История открытия квантов: Планк, Эйнштейн, Милликен в 1912-15 гг., Комптон при рассеянии γ -квантов на электронах в 1922.

Нейтрино предположил в 1930 г. В. Паули для устранения трудности с β -радиоактивным распадом и законом сохранения энергии. Экспериментально существование нейтрино было подтверждено (установлено) в 1956 г. Райнесом и Коуэном.

С 1930 до начала 1950-х гг. изучение элементарных частиц было связано с исследованием космических лучей. В 1932 г. Карлом Андерсоном³⁵ был обнаружен позитрон (первая античастица). Его существование вытекает из теории Дирака (1928-31 гг.). В 1936 г. К. Андерсон и С. Неддермейер обнаружили при исследовании космических лучей мюоны обоих знаков. В 1947 г. группой Пауэлла³⁶ (S. Powell) были открыты π^+ и π^- -мезоны в 274 раз тяжелее электрона, играющие важную роль во взаимодействии нейтронов с протонами в ядрах. В 1935 г. их существование предположил Хидэки Юкава.

Конец 40-х – начало 50-х гг. ознаменовались открытием странных частиц. Первые частицы этой группы K^+ и K^- -мезоны, Λ -гипероны были открыты в космических лучах, последующие – на ускорителях заряженных частиц. С начала 50-х ускорители становятся основным инструментом исследования элементарных частиц. Ускоренные протоны и электроны вызывают потоки других

³⁴ МЮОНЫ, устаревшее название МЮ-МЕЗОНЫ; в класс мезонов не входят. Мюоны (μ), нестабильные положительно (μ^+) и отрицательно (μ^-) заряженные элементарные частицы со спином $1/2$ и массой около 207 электронных масс и временем жизни $\sim 10^{-6}$ с; относятся к лептонам.

³⁵ АНДЕРСОН (Anderson) Карл Дэвид (3 сентября 1905-11 января 1991), американский физик, член Национальной АН (1967). Окончил Калифорнийский технологический институт (1927). Основные труды посвящены рентгеновским и гамма-лучам, физике космических лучей, физике элементарных частиц. Открыл в космических лучах позитроны (1932) и мюоны (1936). В 1933 открыл рождение электронно-позитронной пары из гамма-кванта. Нобелевская премия (1936). Медаль им. Э. Грессона (1937), им. Дж. Эриксона (1960).

³⁶ ПАУЭЛЛ (Поуэлл) (Powell) Сесил Франк (1903-69), английский физик, иностранный член АН СССР (1958). Разработал метод ядерных фотографических эмульсий. Открыл (1947) *пи*-мезоны в космических лучах. Один из инициаторов создания Европейского центра ядерных исследований. Нобелевская премия (1950). Золотая медаль им. Ломоносова АН СССР (1968).

частиц, которые регистрируются с помощью сложных детекторов. В 90-х гг. энергии составляли сотни ГэВ (и тысячи к 2000 г.).

С ростом энергии регистрируются все более тяжелые частицы. В том числе неустойчивые – резонансы, которые составляют основную часть элементарных частиц.

В 1974 г. были обнаружены массивные (3-4 протонные массы), в то же время относительно устойчивые частицы *пси*-частицы, время жизни которых в 10^3 раз больше времени жизни резонансов. Они оказываются тесно связанными с новым семейством элементарных частиц – очарованных, первые представители которого были открыты в 1976 г. (D -мезоны и Λ_c -барионы).

В 1977 г. были открыты еще более тяжелые частицы (около 10 масс протона) – ипсилон (Y) – частицы аномально устойчивые для частиц столь больших масс. Они явились провозвестниками прелестных (красивых, beauty - квантовое число) частиц, первые представители которых открыты в 1981-83 гг. (B -мезоны) и Λ_b -барионы – в 1992 г.

В 1962 г. было выяснено, что в природе существует не одно, а, по крайней мере, два нейтрино: ν_e и ν_μ , а в 1975 г. был открыт τ -лептон (почти 2 массы протона), но в остальном повторяющий свойства электрона и мюона. Вскоре стало ясно, что существует тау-нейтрино ν_τ .

Наконец, в 1983 г. на протон-антипротонном коллайдере открыты самые тяжелые элементарные частицы: заряженные промежуточные бозоны³⁷ W^\pm ($m_W \approx 80$ ГэВ) и нейтральный промежуточный бозон Z^0 ($m_Z = 91$ ГэВ).

Таким образом, за 100 с лишним лет, прошедших после открытия электрона, выявлено большое число разнообразных микрочастиц. Для их описания кроме электрического заряда, массы, момента количества движения потребовалось много новых характеристик: *странность, очарование, красота*. Для их описания понадобилась квантовая механика, теория относительности. Затем понадобилась квантовая теория поля, квантовая электродинамика, квантовая мезодинамика (Юкава). В квантовой электродинамике появилась теория перенормировки.

Следующий шаг – калибровочные поля Янга-Миллса, которые включают в себя симметрию взаимодействия.

9.2. Виды материи в микромире

Обычная материя образуется из электронов и кварков, группирующихся в объекты, нейтральные по цветовому, а затем и по электрическому заряду. Цветовая сила нейтрализуется, о чем подробнее будет сказано ниже, когда частицы объединяются в триплеты. (Отсюда и сам термин «цвет», взятый из оптики: три основных цвета при смешении дают белый.) Таким образом, кварки, для которых цветовая сила является главной, образуют триплеты. Но кварки, а они под-

³⁷ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ВЕКТОРНЫЕ БОЗОНЫ, частицы W , Z^0 с массами порядка 80 и 90 ГэВ — переносчики слабого взаимодействия. Экспериментально открыты в 1983.

разделяются на *u*-кварки (от англ. up – верхний) и *d*-кварки (от англ. down – нижний), имеют еще и электрический заряд, равный $+\frac{2}{3}$ *u*-кварка и $-\frac{1}{3}$ *d*-кварка. Два *u*-кварка и один *d*-кварк дают электрический заряд +1 и образуют протон, а один *u*-кварк и два *d*-кварка дают нулевой электрический заряд и образуют нейтрон.

Стабильные протоны и нейтроны, притягиваемые друг к другу остаточными цветовыми силами взаимодействия между составляющими их кварками, образуют нейтральное по цвету ядро атома. Но ядра несут положительный электрический заряд и, притягивая отрицательные электроны, вращающиеся вокруг ядра наподобие планет, обращающихся вокруг Солнца, стремятся образовать нейтральный атом. Электроны на своих орбитах удалены от ядра на расстояния, в десятки тысяч раз превышающие радиус ядра, – свидетельство того, что удерживающие их электрические силы гораздо слабее ядерных. Благодаря силе цветового взаимодействия 99,945% массы атома заключено в его ядре. Масса *u*- и *d*-кварков примерно в 600 раз больше массы электрона. Поэтому электроны намного легче и подвижнее ядер. Их движением в веществе обусловлены электрические явления.

Существует несколько сот природных разновидностей атомов (включая изотопы), различающихся числом нейтронов и протонов в ядре и соответственно числом электронов на орбитах. Самый простой – атом водорода, состоящий из ядра в виде протона и обращающегося вокруг него единственного электрона. Вся «видимая» материя в природе состоит из атомов и частично «разобранных» атомов, которые называются ионами. Ионы – это атомы, которые, потеряв (или приобретя) несколько электронов, стали заряженными частицами. Материя, состоящая почти из одних ионов, называется плазмой. Звезды, горящие за счет идущих в центрах термоядерных реакций, состоят в основном из плазмы, а поскольку звезды – самая распространенная форма материи во Вселенной, можно сказать, что и вся Вселенная состоит в основном из плазмы. Точнее, звезды – это преимущественно полностью ионизованный газообразный водород, т.е. смесь отдельных протонов и электронов, а стало быть, из нее и состоит почти вся видимая Вселенная.

Это – видимая материя. Но во Вселенной есть еще невидимая материя. И есть частицы, выступающие в роли носителей сил. Существуют античастицы и возбужденные состояния некоторых частиц. Все это приводит к явно чрезмерному изобилию «элементарных» частиц. В этом изобилии можно найти указание на действительную, истинную природу элементарных частиц и сил, действующих между ними. Согласно самым последним теориям, частицы в своей основе могут представлять собой протяженные геометрические объекты – «струны» в десятимерном пространстве.

Невидимый мир. Во Вселенной имеется не только видимая материя (а также черные дыры и «темная материя», например холодные планеты, которые станут видимыми, если их осветить). Существует и подлинно невидимая материя, пронизывающая всех нас и всю Вселенную ежесекундно. Она представляет собой быстро движущийся газ из частиц одного сорта – электронных нейтрино.

Электронное нейтрино является партнером электрона, но не имеет электрического заряда. Нейтрино несут лишь так называемый слабый заряд. Их масса покоя чрезвычайно мала (она меньше 0,000015 массы электрона). Но с гравитационным полем они взаимодействуют, поскольку обладают кинетической энергией E , которой соответствует эффективная масса m , согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$, где c – скорость света.

Таблица 4.3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Частица	Масса покоя, МэВ/ c^2	Электрический заряд	Цветовой заряд	Слабый заряд
КВАРКИ				
<i>u</i> -кварк	350	+2/3	Красный, зеленый, синий	+1/2
<i>d</i> -кварк	350	-1/3	Красный, зеленый, синий	-1/2
ЛЕПТОНЫ				
Электронное нейтрино	<0,000015	0	0	+1/2
Электрон	0,511	-1	0	-1/2

Ключевая роль нейтрино заключается в том, что оно способствует превращению *u*-кварков в *d*-кварки, в результате чего протон превращается в нейтрон. Нейтрино играет роль «иглы карбюратора» для звездных термоядерных реакций, в которых четыре протона (ядра водорода) объединяются, образуя ядро гелия. Но поскольку ядро гелия состоит не из четырех протонов, а из двух протонов и двух нейтронов, для такого ядерного синтеза нужно, чтобы два *u*-кварка превратились в два *d*-кварка. От интенсивности превращения зависит, насколько быстро будут гореть звезды. А процесс превращения определяется слабыми зарядами и силами слабого взаимодействия между частицами. При этом *u*-кварк (электрический заряд +2/3, слабый заряд +1/2), взаимодействуя с электроном (электрический заряд -1, слабый заряд -1/2), образует *d*-кварк (электрический заряд -1/3, слабый заряд -1/2) и электронное нейтрино (электрический заряд 0, слабый заряд +1/2). Цветовые заряды (или просто цвета)

двух кварков в этом процессе компенсируются без нейтрино. Роль нейтрино состоит в том, чтобы уносить нескомпенсированный слабый заряд. Поэтому скорость превращения зависит от того, насколько слабы слабые силы. Если бы они были слабее, чем они есть, то звезды вообще не горели бы. Если же они были бы более сильными, то звезды давно бы выгорели.

А что же нейтрино? Поскольку эти частицы крайне слабо взаимодействуют с другим веществом, они почти сразу уходят из звезд, в которых родились. Все звезды сияют, испуская нейтрино, а нейтрино днем и ночью просвечивают наши тела и всю Землю. Так они странствуют по Вселенной, пока не вступят, может быть, в новое взаимодействие.

Переносчики взаимодействий. За счет чего возникают силы, действующие между частицами на расстоянии? Современная физика отвечает: за счет обмена другими частицами. Представьте себе двух конькобежцев, перебрасывающихся мячом. Сообщая мячу импульс при броске и получая импульс с принятым мячом, оба получают толчок в направлении друг от друга. Так можно объяснить возникновение сил отталкивания. Но в квантовой механике, рассматривающей явления в области микромира, допускаются необычные растяжение и делокализация событий, что приводит, казалось бы, к невозможному: один из конькобежцев бросает мяч в направлении *от* другого, но тот тем не менее *может* этот мяч поймать. Нетрудно сообразить, что, будь такое возможно (а в мире элементарных частиц это возможно), между конькобежцами возникло бы притяжение.

Частицы, благодаря обмену которыми возникают силы взаимодействия между четырьмя рассмотренными выше «частицами материи», называются калибровочными частицами. Каждому из четырех взаимодействий – сильному, электромагнитному, слабому и гравитационному – соответствует свой набор калибровочных частиц. Частицами-переносчиками сильного взаимодействия являются глюоны (их всего восемь). Фотон – переносчик электромагнитного взаимодействия (он один, а фотоны мы воспринимаем как свет). Частицами-переносчиками слабого взаимодействия являются промежуточные векторные бозоны (в 1983 и 1984 были открыты W^+ , W^- -бозоны и нейтральный Z -бозон). Частицей-переносчиком гравитационного взаимодействия является пока еще гипотетический гравитон (он должен быть один). Все эти частицы, кроме фотона и гравитона, которые могут пробегать бесконечно большие расстояния, существуют лишь в процессе обмена между материальными частицами. Фотоны заполняют Вселенную светом, а гравитоны – гравитационными волнами (пока еще с достоверностью не обнаруженными).

О частице, способной испускать калибровочные частицы, говорят, что она окружена соответствующим полем сил. Так, электроны, способные испускать фотоны, окружены электрическими и магнитными полями, а также слабыми и гравитационными полями. Кварки тоже окружены всеми этими полями, но еще и полем сильного взаимодействия. На частицы с цветовым зарядом в поле цветовых сил действует цветовая сила. То же самое относится к другим силам природы. Поэтому можно сказать, что мир состоит из вещества (материальных частиц) и поля (калибровочных частиц). Об этом подробнее ниже.

Антивещество. Каждой частице отвечает античастица, с которой частица может взаимно уничтожиться, т.е. «аннигилировать», в результате чего высвобождается энергия. «Чистой» энергии самой по себе, однако, не существует; в результате аннигиляции возникают новые частицы (например, фотоны), уносящие эту энергию.

Античастица в большинстве случаев обладает противоположными по отношению к соответствующей частице свойствами: если частица под действием сильного, слабого или электромагнитного полей движется влево, то ее античастица будет двигаться вправо. Короче говоря, античастица имеет противоположные знаки всех зарядов (кроме массового заряда). Если частица составная, как, например, нейтрон, то ее античастица состоит из компонент с противоположными знаками зарядов. Так, антиэлектрон имеет электрический заряд $+1$, слабый заряд $+1/2$ и называется позитроном. Антинейтрон состоит из u -антикварков с электрическим зарядом $-2/3$ и d -антикварков с электрическим зарядом $+1/3$. Истинно нейтральные частицы являются своими собственными античастицами: античастица фотона – фотон.

Согласно современным теоретическим представлениям, своя античастица должна быть для каждой существующей в природе частицы. И многие античастицы, в том числе позитроны и антинейтроны, действительно были получены в лаборатории. Следствия этого исключительно важны и лежат в основе всей экспериментальной физики элементарных частиц. Согласно теории относительности, масса и энергия эквивалентны, и в определенных условиях энергия может быть превращена в массу. Поскольку заряд сохраняется, а заряд вакуума (пустого пространства) равен нулю, из вакуума, как кролики из шляпы фокусника, могут возникать любые пары частиц и античастиц (с нулевым суммарным зарядом), лишь бы энергия была достаточной для создания их массы.

Так, в экспериментах одного из обычных сегодня типов электроны заставляют сталкиваться с позитронами, создавая энергию с нулевым полным зарядом, которая может реализовываться в виде любой пары частица – античастица, лишь бы ее хватало для создания их массы. Точно так же в любом другом эксперименте со столкновениями частиц энергия может возникать в виде новых частиц любых типов, если они образуют пары с нулевым суммарным зарядом. Таким образом, ускорители частиц не просто зондируют структуру материи, а создают новые виды материи, в том числе и такие, которых, возможно, уже не было со времени Большого взрыва, давшего начало нашей Вселенной.

Поколения частиц. Эксперименты на ускорителях показали, что четверка (квартет) материальных частиц по крайней мере дважды повторяется при более высоких значениях массы. Во втором поколении место электрона занимает мюон (с массой, примерно в 200 раз большей массы электрона, но с прежними значениями всех остальных зарядов), место электронного нейтрино – мюонное (которое сопутствует в слабых взаимодействиях мюону так же, как электрону сопутствует электронное нейтрино), место u -кварка занимает c -кварк (*очарованный*), а d -кварка – s -кварк (*странный*). В третьем поколении квартет состоит из тау-лептона, тау-нейтрино, t -кварка и b -кварка.

Масса t -кварка примерно в 500 раз больше массы самого легкого – d -кварка. Экспериментально установлено, что существуют только три типа легких нейтрино. Таким образом, четвертое поколение частиц или не существует вовсе, или соответствующие нейтрино являются очень тяжелыми. Это согласуется с космологическими данными, в соответствии с которыми могут существовать не более четырех типов легких нейтрино.

В экспериментах с частицами высоких энергий электрон, мюон, тау-лептон и соответствующие нейтрино выступают как обособленные частицы. Они не несут цветового заряда и вступают только в слабые и электромагнитные взаимодействия. В совокупности они называются *лептонами*.

Кварки же под действием цветовых сил объединяются в сильно взаимодействующие частицы, преобладающие в большинстве экспериментов физики высоких энергий. Такие частицы называются *адронами*. В них входят два подкласса: *барионы* (например, протон и нейтрон), которые состоят из трех кварков, и *мезоны*, состоящие из кварка и антикварка. В 1947 в космических лучах был открыт первый мезон, названный пионом (или пи-мезоном), и некоторое время считалось, что обмен этими частицами – главная причина ядерных сил. Особой известностью в физике элементарных частиц пользовались также адроны омега-минус, открытые в 1964 в Брукхейвенской национальной лаборатории (США), и джей-пси-частица (J/ψ -мезон), открытая одновременно в Брукхейвене и в Стэнфордском центре линейных ускорителей (тоже в США) в 1974. Существование омега-минус-частицы было предсказано М. Гелл-Манном в его так называемой « SU_3 -теории» (другое название – «восьмеричный путь»), в которой впервые было высказано предположение о возможности существования кварков (и было дано им это название). Десятилетие спустя открытие частицы J/ψ подтвердило существование c -кварка и заставило, наконец, всех поверить и в кварковую модель, и в теорию, объединившую электромагнитные и слабые силы (см. ниже).

Частицы второго и третьего поколения не менее реальны, чем первого. Правда, возникнув, они за миллионные или миллиардные доли секунды распадаются на обычные частицы первого поколения: электрон, электронное нейтрино, а также u - и d -кварки. Вопрос о том, почему в природе существуют несколько поколений частиц, до сих пор остается загадкой.

О разных поколениях кварков и лептонов часто говорят (что, конечно, несколько эксцентрично) как о разных «ароматах» частиц. Необходимость их объяснения называется проблемой «аромата».

9.3. Поле и вещество

Одним из принципиальных различий между частицами является различие между бозонами и фермионами. Все частицы делятся на эти два основных класса. Одинаковые бозоны могут налагаться друг на друга или перекрываться, а одинаковые фермионы – нет. Наложение происходит (или не происходит) в дискретных энергетических состояниях, на которые квантовая механика делит природу. Эти состояния представляют собой как бы отдельные ячейки, в кото-

рые можно помещать частицы. Так вот, в одну ячейку можно поместить сколько угодно одинаковых бозонов, но только один фермион.

В качестве примера рассмотрим такие ячейки, или «состояния», для электрона, вращающегося вокруг ядра атома. В отличие от планет Солнечной системы, электрон по законам квантовой механики не может обращаться по любой эллиптической орбите, для него существует только дискретный ряд разрешенных «состояний движения». Наборы таких состояний, группируемые в соответствии с расстоянием от электрона до ядра, называются *орбиталями*. В первой орбитали имеются два состояния с разными моментами импульса и, следовательно, две разрешенные ячейки, а в более высоких орбиталях – восемь и более ячеек.

Поскольку электрон относится к фермионам, в каждой ячейке может находиться только один электрон. Отсюда вытекают очень важные следствия – вся химия, поскольку химические свойства веществ определяются взаимодействиями между соответствующими атомами. Если идти по периодической системе элементов от одного атома к другому в порядке увеличения на единицу числа протонов в ядре (число электронов тоже будет соответственно увеличиваться), то первые два электрона займут первую орбиталь, следующие восемь расположатся на второй и т.д. Этим последовательным изменением электронной структуры атомов от элемента к элементу обусловлены закономерности в их химических свойствах.

Если бы электроны были бозонами, то все электроны атома могли бы занимать одну и ту же орбиталь, соответствующую минимальной энергии. При этом свойства всего вещества во Вселенной были бы совершенно другими, и в том виде, в котором мы ее знаем, Вселенная была бы невозможна.

Все лептоны – электрон, мюон, тау-лептон и соответствующие им нейтрино – являются фермионами. То же можно сказать о кварках. Таким образом, все частицы, которые образуют «вещество», основной наполнитель Вселенной, а также невидимые нейтрино, являются фермионами. Это весьма существенно: фермионы не могут совмещаться.

В то же время все «калибровочные частицы», которыми обмениваются взаимодействующие материальные частицы и которые создают поле сил (см. выше), являются бозонами, что тоже очень важно. Так, например, много фотонов могут находиться в одном состоянии, образуя магнитное поле вокруг магнита или электрическое поле вокруг электрического заряда. Благодаря этому же возможен лазер.

Спин. Различие между бозонами и фермионами связано с еще одной характеристикой элементарных частиц – *спином*. Как это ни удивительно, но все фундаментальные частицы имеют собственный момент импульса или, проще говоря, вращаются вокруг своей оси. Момент импульса – характеристика вращательного движения, так же как суммарный импульс – поступательного. В любых взаимодействиях момент импульса и импульс сохраняются.

В микромире момент импульса квантуется, т.е. принимает дискретные значения. В подходящих единицах измерения лептоны и кварки имеют спин, равный $1/2$, а калибровочные частицы – спин, равный 1 (кроме гравитона, кото-

рый экспериментально пока не наблюдался, а теоретически должен иметь спин, равный 2). Поскольку лептоны и кварки – фермионы, а калибровочные частицы – бозоны, можно предположить, что «фермионность» связана со спином $1/2$, а «бозонность» – со спином 1 (или 2). Действительно, и эксперимент, и теория подтверждают, что если у частицы полуцелый спин, то она – фермион, а если целый – то бозон.

9.4. Калибровочные теории

Во всех случаях силы возникают вследствие обмена бозонами между фермионами. Так, цветовая сила взаимодействия между двумя кварками (кварки – фермионы) возникает за счет обмена глюонами. Подобный обмен постоянно происходит в протонах, нейтронах и атомных ядрах. Точно так же фотоны, которыми обмениваются электроны и кварки, создают электрические силы притяжения, удерживающие электроны в атоме, а промежуточные векторные бозоны, которыми обмениваются лептоны и кварки, создают силы слабого взаимодействия, ответственные за превращение протонов в нейтроны при термоядерных реакциях в звездах.

Теория такого обмена изящна, проста и, вероятно, правильна. Она называется *калибровочной теорией*. Но в настоящее время существуют лишь независимые калибровочные теории сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий и сходная с ними, хотя кое в чем и отличающаяся, калибровочная теория гравитации. Одной из важнейших физических проблем является сведение этих отдельных теорий в единую и вместе с тем простую теорию, в которой все они стали бы разными аспектами единой реальности – как грани кристалла.

Простейшей и самой старой из калибровочных теорий является калибровочная теория электромагнитного взаимодействия. В ней заряд электрона сравнивается (калибруется) с зарядом другого электрона, удаленного от него. Как можно сравнивать заряды? Можно, например, приблизить второй электрон к первому и сравнивать их силы взаимодействия. Но не меняется ли заряд электрона при его перемещении в другую точку пространства? Единственный способ проверки – послать от ближнего электрона к дальнему сигнал и посмотреть, как он среагирует. Сигналом является калибровочная частица – фотон. Чтобы можно было проверить заряд на удаленных частицах, необходим фотон.

В математическом отношении эта теория отличается чрезвычайной точностью и красотой. Из описанного выше «калибровочного принципа» вытекает вся квантовая электродинамика (квантовая теория электромагнетизма), а также теория электромагнитного поля Максвелла – одно из величайших научных достижений 19 в.

Почему же столь простой принцип оказывается столь плодотворным? Видимо, он выражает некую соотнесенность разных частей Вселенной, позволяя проводить измерения во Вселенной. В математическом плане поле интерпретируется геометрически как кривизна некоторого мыслимого «внутреннего» пространства. Измерение же заряда – это измерение полной «внутренней кривизны» вокруг частицы. Калибровочные теории сильного и слабого взаимодей-

ствий отличаются от электромагнитной калибровочной теории только внутренней геометрической «структурой» соответствующего заряда. На вопрос о том, где именно находится это внутреннее пространство, пытаются ответить многомерные единые теории поля, которые здесь не рассматриваются.

Физика элементарных частиц пока не завершена. Еще далеко не ясно, достаточно ли имеющихся данных для полного понимания природы частиц и сил, а также истинной природы и размерности пространства и времени. Нужны ли нам для этого эксперименты с энергиями 10^{15} ГэВ или же будет достаточно усилий мысли? Ответа пока нет. Но можно сказать с уверенностью, что окончательная картина будет проста, изящна и красива. Возможно, что принципиальных идей окажется не так много: калибровочный принцип, пространства высших размерностей, коллапс и расширение, а прежде всего – геометрия.

Таблица 4.4. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Взаимодействие	Относительная интенсивность на расстоянии 10^{-13} см	РADIUS действия	Переносчик взаимодействия	Масса покоя переносчика, МэВ/ c^2	Спин переносчика
Сильное	1	10^{-13} см <	Глюон	0	1
Электромагнитное	0,01	\square	Фотон	0	1
Слабое	10^{-13}	10^{-16} см <	W^+	80400	1
			W^-	80400	1
			Z^0	91190	1
Гравитационное	10^{-38}	\square	Гравитон	0	2

РАЗДЕЛ 5. ФИЗИКА МЕГАМИРА

10. Астрономия и астрофизика³⁸

Неумение изучать человека
заставляет изучать все остальное.
Б. Паскаль

10.1. Происхождение Солнечной системы

Ввиду исчезновения курса астрономии из программ среднего и подавляющего большинства специальностей высшего образования дадим вначале необходимые сведения по происхождению непосредственно окружающей нас части Вселенной – Солнечной системы.

10.1.1. Формирование и судьба Солнца

Библия (ветхий завет) дает картину сотворения мира. Та картина мироздания, которую даёт современная физика и астрономия оказалась избыточной для первоначальных наметок. Но задумаемся, так ли это, если учесть так называемый антропный принцип, согласно которому все, что существует должно отвечать возможности существования человека.

Существование же человека связано с низкоэнтропийными процессами в организме и высокоэнтропийными в окружающем мире. Источник органической жизни для человека – Солнце. Оно образовалось из газопылевого облака путем гравитационного сжатия и разогрева последнего. Оно продолжало бы и дальше сжиматься, если бы при определенном давлении и температуре в игру не вступил бы другой источник энергии – ядерные реакции синтеза *He* из *H*. Без термоядерных реакций Солнце было бы намного меньше и горячее, чем сейчас и «жило» бы меньше.

Гравитация – главная сила в образовании Солнца. Хотя оно светило бы и без термоядерных реакций, его свечение было бы губительным для нас. Солнце уже просуществовало 5 млрд лет. Что ждет его дальше? В ближайшие 5-6 млрд лет оно начнет раздуваться и поглотит Землю, превратившись в красного гиганта. Как Альдебаран в созвездии Тельца и Бетельгейзе в созвездии Ориона. Плотное ядро увеличивается в размерах. Это прототип будущего белого карлика. Таких в Млечном пути 10%. От гравитационного коллапса белые карлики «спасает» только принцип Паули, примененный к электронам.

Белый карлик притягивает оболочку красного гиганта, пока не превращается в звезду размерами с Землю (настоящий белый карлик), который, по мере остывания, превратится в черный карлик.

³⁸ ЛИТЕРАТУРА: Шкловский И.С. *Звезды: их рождение, жизнь и смерть*. М., 1984.
Горбацкий В.Г. *Новоподобные и новые звезды*. М., 1974.
Дайсон Ф., Тер Хаар Д. *Нейтронные звезды и пульсары*. М., 1973.
Литература (дополнительная) дана в Приложении 1.

Но не все звезды повторяют жизненный путь Солнца. Виной тому «предел Чандрасекара» (1929). $1,4M_{\odot}$ – предел Чандрасекара, уточненный Л.Д. Ландау, где M_{\odot} – масса Солнца.

А как сложится судьба звезды массой $2M_{\odot}$? В некий критический момент ядро достигнет предела Чандрасекара и принцип запрета Паули уже не сможет обеспечить противодействие, необходимое для компенсации возросших сил гравитации. Ядро может коллапсировать внутрь, что приведет к повышению давления и температуры. Начнутся интенсивные ядерные реакции и колоссальная энергия выделится в форме нейтрино, которые нагреют внешнюю оболочку и затем последует грандиозный взрыв. Звезда превратится в сверхновую.

А что произойдет далее со все ещё коллапсирующим ядром? Оно превратится в нейтронную звезду, в которой наступит новое равновесие, основанное на применении принципа Паули к нейтронам (давление нейтронного вырождения).

Если нейтронная звезда по массе превзойдет ещё один предел (Ландау-Оппенгеймера-Волкова) $2,5M_{\odot}$, то, скорее всего, мы получим черную дыру. Это область пространства-времени со столь сильным тяготением, что даже свет не способен вырваться за её пределы (вторая космическая скорость больше скорости света). Черная дыра массой в 10^6M_{\odot} возможно находится в центре нашего Млечного пути.

10.1.2. Формирование Солнечной системы

Вопрос о том, как образовалась Солнечная система, пожалуй, наиболее трудный в планетологии. Для ответа на него у нас пока мало данных, которые помогли бы восстановить протекавшие в ту далекую эпоху сложные физические и химические процессы. Теория формирования Солнечной системы должна объяснить множество фактов, включая ее механическое состояние, химический состав и данные изотопной хронологии. При этом желательно опираться на реальные явления, наблюдаемые вблизи формирующихся и молодых звезд.

Механическое состояние. Планеты обращаются вокруг Солнца в одном направлении, по почти круговым орбитам, лежащим почти в одной плоскости. Большинство из них вращается вокруг своей оси в том же направлении, что и Солнце. Все это указывает, что предшественником Солнечной системы был вращающийся диск, который естественно образуется при сжатии самогравитирующей системы с сохранением момента импульса и следующим из этого увеличением угловой скорости. (Момент импульса, или угловой момент планеты, – это произведение ее массы на расстояние от Солнца и на орбитальную скорость. Момент Солнца определяется его осевым вращением и приблизительно равен произведению массы на радиус и на скорость вращения; осевые моменты планет пренебрежимо малы.)

Солнце содержит в себе 99% массы Солнечной системы, но только ок. 1% ее момента импульса. Теория должна объяснить, почему большая часть массы системы сосредоточена в Солнце, а подавляющая часть момента импульса – во внешних планетах. Имеющиеся теоретические модели формирования Солнечной системы указывают, что вначале Солнце вращалось значительно быстрее, чем сейчас. Затем момент импульса от молодого Солнца передался внешним

частям Солнечной системы; астрономы полагают, что гравитационные и магнитные силы затормозили вращение Солнца и ускорили движение планет.

Уже два века известно приблизительное правило регулярного распределения планетных расстояний от Солнца (правило Тициуса – Боде), но объяснения ему нет. В системах спутников внешних планет прослеживаются те же закономерности, что и в планетной системе в целом; вероятно, процессы их формирования имели много общего.

Химический состав. В Солнечной системе наблюдается сильный градиент (различие) химического состава: близкие к Солнцу планеты и спутники состоят из тугоплавких материалов, а в составе далеких тел много летучих элементов. Это означает, что в эпоху формирования Солнечной системы существовал большой градиент температуры. Современные астрофизические модели химической конденсации предполагают, что исходный состав протопланетного облака был близок к составу межзвездной среды и Солнца: по массе до 75% водорода, до 25% гелия и менее 1% всех прочих элементов. Эти модели успешно объясняют наблюдаемые вариации химического состава в Солнечной системе.

О химическом составе далеких объектов можно судить на основании значения их средней плотности, а также по спектрам их поверхности и атмосферы. Значительно точнее это удалось бы сделать путем анализа образцов планетного вещества, но пока у нас есть только образцы с Луны и метеориты. Исследуя метеориты, мы начинаем понимать химические процессы в первичной туманности. Однако процесс агломерации крупных планет из мелких частиц пока остается неясным.

Изотопные данные. Изотопный состав метеоритов указывает, что формирование Солнечной системы происходило $4,6 \pm 0,1$ млрд. лет назад и длилось не более 100 млн. лет. Аномалии изотопов неона, кислорода, магния, алюминия и др. элементов свидетельствуют, что в процессе коллапса межзвездного облака, породившего Солнечную систему, в него попали продукты взрыва близкой сверхновой звезды.

Теории формирования. Научные теории формирования Солнечной системы можно разделить на три категории: приливные, аккреционные и небулярные. Последние привлекают сейчас наибольший интерес.

Приливная теория, по-видимому, впервые предложенная Бюффеном (1707–1788), непосредственно не связывает между собой формирование звезды и планет. Предполагается, что пролетевшая мимо Солнца другая звезда путем приливного взаимодействия вытянула из него (или из себя) струю вещества, из которого сформировались планеты. Эта идея сталкивается с множеством физических проблем; например, выброшенное звездой горячее вещество должно расплыться, а не конденсироваться. Сейчас приливная теория непопулярна, поскольку не может объяснить механические особенности Солнечной системы и представляет ее рождение как случайное и крайне редкое событие.

Аккреционная теория предполагает, что молодое Солнце захватило вещество будущей планетной системы, пролетая сквозь плотное межзвездное облако. Действительно, молодые звезды обычно встречаются вблизи крупных

межзвездных облаков. Однако в рамках аккреционной теории трудно объяснить градиент химического состава в планетной системе.

Наиболее разработана и общепринята сейчас **небулярная гипотеза**, предложенная Кантом в конце 18 в. Ее основная идея состоит в том, что Солнце и планеты формировались одновременно из единого вращающегося облака. Сжимаясь, оно превратилось в диск, в центре которого образовалось Солнце, а на периферии – планеты. Отметим, что эта идея отличается от гипотезы Лапласа, согласно которой сначала из облака сформировалось Солнце, а затем по мере его сжатия центробежная сила отрывала с экватора газовые кольца, сконденсировавшиеся позже в планеты. Гипотеза Лапласа сталкивается с трудностями физического характера, которые не удается преодолеть уже 200 лет.

Наиболее удачный современный вариант небулярной теории создал А. Камерон с коллегами. В их модели протопланетная туманность была примерно вдвое массивнее нынешней планетной системы. В течение первых 100 млн. лет формирующееся Солнце активно выбрасывало из нее вещество. Такое поведение характерно для молодых звезд, которые по имени прототипа называют звездами типа Т Тельца. Распределение давления и температуры вещества туманности в модели Камерона хорошо согласуется с градиентом химического состава Солнечной системы.

Таким образом, наиболее вероятно, что Солнце и планеты сформировались из единого сжимающегося облака. В центральной его части, где плотность и температура были выше, сохранились только тугоплавкие вещества, а на периферии сохранились и летучие; этим объясняется градиент химического состава. В соответствии с этой моделью формирование планетной системы должно сопровождать раннюю эволюцию всех звезд типа Солнца.

10.2. Астрономия

Астрономия подошла к 20 в., обогащенная как новыми объектами, так и методами их исследования. Лидирующая роль астрометрии и небесной механики уменьшилась, но осталась заметной. Стремительно развивалась астрофизика. Астрономы выясняли состав Солнечной системы, ее строение и характеристики больших и малых тел. Они познакомились со многими явлениями на Солнце, хотя и не понимали пока механизмов выделения его гигантской энергии. Они измерили расстояния до ближайших звезд и, в общем, представляли распределение звезд в нашей Галактике. Ученые выяснили, что некоторые туманности газовые, другие состоят из мириад звезд, а третьи содержат и то, и другое. У них уже появились мощные, хотя и недостаточно совершенные новые приборы для изучения физического состояния, распределения и движения различных объектов во Вселенной.

ДВАДЦАТЫЙ ВЕК

Астрономию 20 в. можно разделить на два периода – до и после Второй мировой войны. В первый период появление мощных телескопов и других при-

боров дало астрономам возможность наблюдать слабые и далекие объекты, а новые научные теории, в особенности теория относительности и квантовая механика, позволили интерпретировать эти наблюдения. Удалось понять механизмы выделения энергии у Солнца и звезд, а также их эволюционный путь от рождения до смерти. Еще более грандиозными были открытия в космологии: удалось многое узнать о мире, в котором протекает жизнь звезд и миллиардов звездных систем, подобных нашей Галактике, о рождении и возможных вариантах эволюции этого мира. Новые факты потребовали изменить не только смысл слова «Вселенная», которое прежде использовали лишь для обозначения нашей Галактики, но и масштабы времени в астрономии с миллионов на миллиарды лет.

Второй период астрономии 20 в. начался, когда ученые вернулись к своим прерванным войной занятиям с новыми идеями и ожиданиями, вооруженные новой техникой. Особенности этого периода состоят в расширении диапазона наблюдений за пределы оптического и в быстром росте, с развитием космонавтики, доступных для обобщения наблюдательных данных. Была создана стройная теория эволюции звезд и доказано, что в конце жизни звезды с ней могут происходить необычные и бурные явления. Астрономы приблизились к ответу на важнейшие вопросы космологии: каковы размер и возраст Вселенной, как эволюционируют галактики и даже какая судьба ожидает Вселенную. Вместе с геофизиками и специалистами по космической технике они изучают в благоприятных условиях объекты Солнечной системы, получая данные об их современном состоянии и прошлом. Астрономы наблюдают рождение звезд в далеких облаках, зарождающиеся в околозвездных газо-пылевых дисках планетные системы и даже сами эти планеты. К концу 20 в с помощью наземных и орбитальных телескопов астрономы узнали почти всю историю Вселенной.

10.3. Космология

Раздел астрономии и астрофизики, изучающий происхождение, крупномасштабную структуру и эволюцию Вселенной. Данные для космологии в основном получают из астрономических наблюдений. Для их интерпретации в настоящее время используется общая теория относительности А. Эйнштейна (1915). Создание этой теории и проведение соответствующих наблюдений позволило в начале 1920-х годов поставить космологию в ряд точных наук, тогда как до этого она скорее была областью философии. Сейчас сложились две космологические школы: эмпирики ограничиваются интерпретацией наблюдательных данных, не экстраполируя свои модели в неизученные области; теоретики пытаются объяснить наблюдаемую Вселенную, используя некоторые гипотезы, отобранные по принципу простоты и элегантности. Широкой известностью пользуется сейчас космологическая модель Большого взрыва, согласно которой расширение Вселенной началось некоторое время тому назад из очень плотного и горячего состояния; обсуждается и стационарная модель Вселенной, в которой она существует вечно и не имеет ни начала, ни конца.

10.3.1. Космологические данные

Под космологическими данными понимают результаты экспериментов и наблюдений, имеющие отношение к Вселенной в целом в широком диапазоне пространства и времени. Любая мыслимая космологическая модель должна удовлетворять этим данным. Можно выделить 6 основных наблюдательных фактов, которые должна объяснить космология:

1. В больших масштабах Вселенная однородна и изотропна, т.е. галактики и их скопления распределены в пространстве равномерно (однородно), а их движение хаотично и не имеет явно выделенного направления (изотропно). Принцип Коперника, «сдвинувшего Землю из центра мира», был обобщен астрономами на Солнечную систему и нашу Галактику, которые также оказались вполне рядовыми. Поэтому, исключая мелкие неоднородности в распределении галактик и их скоплений, астрономы считают Вселенную такой же однородной везде, как и вблизи нас.

2. Вселенная расширяется. Галактики удаляются друг от друга. Это обнаружил американский астроном Э. Хаббл в 1929. Закон Хаббла гласит: чем дальше галактика, тем быстрее она удаляется от нас. Но это не означает, что мы находимся в центре Вселенной: в любой другой галактике наблюдатели видят то же самое. С помощью новых телескопов астрономы углубились во Вселенную значительно дальше, чем Хаббл, но его закон остался верен.

3. Пространство вокруг Земли заполнено фоновым микроволновым радиоизлучением. Открытое в 1965, оно стало, наряду с галактиками, главным объектом космологии. Его важным свойством является высокая изотропность (независимость от направления), указывающая на его связь с далекими областями Вселенной и подтверждающая их высокую однородность. Если бы это было излучение нашей Галактики, то оно отражало бы ее структуру. Но эксперименты на баллонах и спутниках доказали, что это излучение в высшей степени однородно и имеет спектр излучения абсолютно черного тела с температурой около 3 К. Очевидно, это реликтовое излучение молодой и горячей Вселенной, сильно остывшее в результате ее расширения.

4. Возраст Земли, метеоритов и самых старых звезд немногим меньше возраста Вселенной, вычисленного по скорости ее расширения. В соответствии с законом Хаббла Вселенная всюду расширяется с одинаковой скоростью, которую называют *постоянной Хаббла* H . По ней можно оценить возраст Вселенной как $1/H$. Современные измерения H приводят к возрасту Вселенной около 20 млрд. лет. Исследования продуктов радиоактивного распада в метеоритах дают возраст около 10 млрд. лет, а самые старые звезды имеют возраст около 15 млрд. лет. До 1950 расстояния до галактик недооценивались, что приводило к завышенному значению H и малому возрасту Вселенной, меньшему возрасту Земли. Чтобы разрешить это противоречие, Г. Бонди, Т. Голд и Ф. Хойл в 1948 предложили стационарную космологическую модель, в которой возраст Вселенной бесконечен, а по мере ее расширения рождается новое вещество.

5. Во всей наблюдаемой Вселенной, от близких звезд до самых далеких галактик, на каждые 10 атомов водорода приходится 1 атом гелия. Кажется не-

вероятным, чтобы всюду местные условия были столь одинаковы. Сильная сторона модели Большого взрыва как раз в том, что она предсказывает везде одинаковое соотношение между гелием и водородом.

6. В областях Вселенной, удаленных от нас в пространстве и во времени, больше активных галактик и квазаров, чем рядом с нами. Это указывает на эволюцию Вселенной и противоречит теории стационарной Вселенной.

10.3.2. Космологические модели

Любая космологическая модель Вселенной опирается на определенную теорию гравитации. Таких теорий много, но лишь некоторые из них удовлетворяют наблюдаемым явлениям. Теория тяготения Ньютона не удовлетворяет им даже в пределах Солнечной системы. Лучше всех согласуется с наблюдениями общая теория относительности Эйнштейна, на основе которой русский метеоролог А. Фридман в 1922 и бельгийский аббат и математик Ж. Леметр в 1927 математически описали расширение Вселенной. Из космологического принципа, постулирующего пространственную однородность и изотропность мира, они получили модель Большого взрыва. Их вывод подтвердился, когда Хаббл обнаружил связь между расстоянием и скоростью разбегания галактик. Второе важное предсказание этой модели, сделанное Г. Гамовым, касалось реликтового излучения, наблюдаемого сейчас как остаток эпохи Большого взрыва. Другие космологические модели не могут так же естественно объяснить это изотропное фоновое излучение.

Горячий Большой взрыв. Согласно космологической модели Фридмана – Леметра, Вселенная возникла в момент Большого взрыва – около 20 млрд. лет назад, и ее расширение продолжается до сих пор, постепенно замедляясь. В первое мгновение взрыва материя Вселенной имела бесконечную плотность и температуру; такое состояние называют сингулярностью.

Согласно общей теории относительности, гравитация не является реальной силой, а есть искривление пространства-времени: чем больше плотность материи, тем сильнее искривление. В момент начальной сингулярности искривление тоже было бесконечным. Можно выразить бесконечную кривизну пространства-времени другими словами, сказав, что в начальный момент материя и пространство одновременно взорвались везде во Вселенной. По мере увеличения объема пространства расширяющейся Вселенной плотность материи в ней падает. С. Хокинг и Р. Пенроуз доказали, что в прошлом непременно было сингулярное состояние, если общая теория относительности применима для описания физических процессов в очень ранней Вселенной.

Чтобы избежать катастрофической сингулярности в прошлом, требуется существенно изменить физику, например, предположив возможность самопроизвольного непрерывного рождения материи, как в теории стационарной Вселенной. Но астрономические наблюдения не дают для этого никаких оснований.

Чем более ранние события мы рассматриваем, тем меньше был их пространственный масштаб; по мере приближения к началу расширения горизонт наблюдателя сжимается (рис. 1). В самые первые мгновения масштаб так мал,

что мы уже не в праве применять общую теорию относительности: для описания явлений в столь малых масштабах требуется квантовая механика. Но квантовой теории гравитации пока не существует, поэтому никто не знает, как развивались события до момента 10^{-43} с, называемого *планковским временем* (в честь отца квантовой теории). В тот момент плотность материи достигала невероятного значения 10^{90} кг/см³, которое нельзя сравнить не только с плотностью окружающих нас тел (менее 10 г/см³), но даже с плотностью атомного ядра (ок. 10^{12} кг/см³) – наибольшей плотностью, доступной в лаборатории. Напомним, что 1 а. е. м. — $1,6605655(86) \cdot 10^{-27}$ кг, а линейный размер ядра 10^{-14} м. Поэтому для современной физики началом расширения Вселенной служит планковское время.

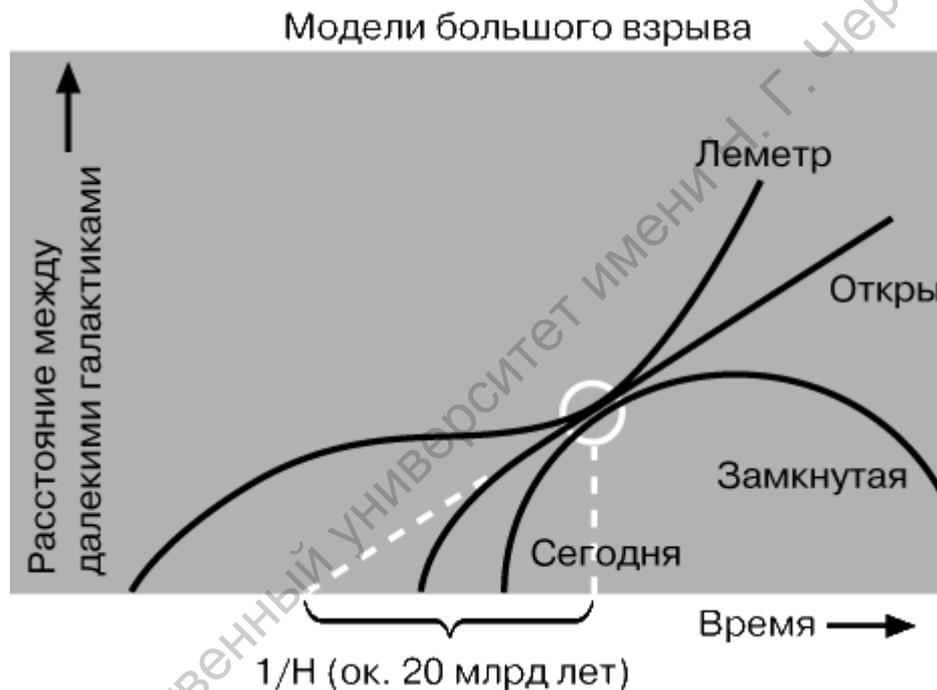


Рис. 5.1. Модели Большого взрыва представлены тремя важными типами: стандартной открытой моделью, стандартной замкнутой и моделью Леметра. По горизонтали отложено время, по вертикали – расстояние между любыми двумя достаточно удаленными друг от друга (чтобы исключить их взаимодействие) галактиками. Кружком отмечена наша эпоха

Если бы Вселенная всегда расширялась с нынешней скоростью, выраженной постоянной Хаббла H , то это началось бы около 20 млрд. лет назад и происходило так, как показано диагональным пунктиром. Если расширение замедляется, как в открытой модели пространственно безграничного мира или в замкнутой модели ограниченного мира, то возраст Вселенной меньше, чем $1/H$. Наименьший возраст у замкнутой модели, расширение которой быстро замедляется и сменяется сжатием. Модель Леметра описывает Вселенную, возраст которой значительно больше, чем $1/H$, поскольку в ее истории есть длительный период, когда расширения почти не происходило. Модель Леметра и открытая модель описывают Вселенную, которая всегда будет расширяться.

Вот при таких условиях немислимо высокой температуры и плотности состоялось рождение Вселенной. Причем это могло быть рождением в прямом смысле: некоторые космологи (скажем, Я.Б. Зельдович в СССР и Л. Паркер в США) считали, что частицы и гамма-фотоны были рождены в ту эпоху гравитационным полем. С точки зрения физики, этот процесс мог состояться, если сингулярность была анизотропной, т.е. гравитационное поле было неоднородным. В этом случае приливные гравитационные силы могли «вытащить» из вакуума реальные частицы, создав таким образом вещество Вселенной.

Изучая процессы, происходившие сразу после Большого взрыва, мы понимаем, что наши физические теории еще весьма несовершенны. Тепловая эволюция ранней Вселенной зависит от рождения массивных элементарных частиц – адронов, о которых ядерная физика знает еще мало. Многие из этих частиц нестабильны и короткоживущи. Швейцарский физик Р.Хагедорн считает, что может существовать великое множество адронов возрастающих масс, которые в изобилии могли формироваться при температуре порядка 10^{12} К, когда гигантская плотность излучения приводила к рождению адронных пар, состоящих из частицы и античастицы. Этот процесс должен был бы ограничить рост температуры в прошлом.

Согласно другой точке зрения, количество типов массивных элементарных частиц ограничено, поэтому температура и плотность в период адронной эры должны были достигать бесконечных значений. В принципе это можно было бы проверить: если бы составляющие адронов – кварки – были стабильными частицами, то некоторое количество кварков и антикварков должно было сохраниться от той горячей эпохи. Но поиск кварков оказался тщетным; скорее всего, они нестабильны.

После первой миллисекунды расширения Вселенной сильное (ядерное) взаимодействие перестало играть в ней определяющую роль: температура снизилась настолько, что атомные ядра перестали разрушаться. Дальнейшие физические процессы определялись слабым взаимодействием, ответственным за рождение легких частиц – *лептонов* (т.е. электронов, позитронов, мезонов и нейтрино) под действием теплового излучения. Когда в ходе расширения температура излучения понизилась примерно до 10^{10} К, лептонные пары перестали рождаться, почти все позитроны и электроны аннигилировали; остались лишь нейтрино и антинейтрино, фотоны и немного сохранившихся с предшествующей эпохи протонов и нейтронов. Так завершилась лептонная эра.

Следующая фаза расширения – фотонная эра – характеризуется абсолютным преобладанием теплового излучения. На каждый сохранившийся протон или электрон приходится по миллиарду фотонов. Вначале это были гамма-кванты, но по мере расширения Вселенной они теряли энергию и становились рентгеновскими, ультрафиолетовыми, оптическими, инфракрасными и, наконец, сейчас стали радиоквантами, которые мы принимаем как чернотельное фоновое (реликтовое) радиоизлучение.

Нерешенные проблемы космологии Большого взрыва. Можно отметить 4 проблемы, стоящие сейчас перед космологической моделью Большого взрыва.

1. Проблема сингулярности: многие сомневаются в применимости общей теории относительности, дающей сингулярность в прошлом. Предлагаются альтернативные космологические теории, свободные от сингулярности.

2. Тесно связана с сингулярностью проблема изотропности Вселенной. Кажется странным, что начавшееся с сингулярного состояния расширение оказалось столь изотропным. Не исключено, правда, что анизотропное вначале расширение постепенно стало изотропным под действием диссипативных сил.

3. Однородная на самых больших масштабах, на меньших масштабах Вселенная весьма неоднородна (галактики, скопления галактик). Трудно понять, как одна лишь гравитация могла привести к появлению такой структуры. Поэтому космологи изучают возможности неоднородных моделей Большого взрыва.

4. Наконец, можно спросить, каково будущее Вселенной? Для ответа необходимо знать среднюю плотность материи во Вселенной. Если она превосходит некоторое критическое значение, то геометрия пространства-времени замкнутая, и в будущем Вселенная непременно сожмется. Замкнутая Вселенная не имеет границ, но ее объем конечен. Если плотность ниже критической, то Вселенная открыта и будет расширяться вечно. Открытая Вселенная бесконечна и имеет только одну сингулярность вначале. Пока наблюдения лучше согласуются с моделью открытой Вселенной.

Происхождение крупномасштабной структуры. У космологов на эту проблему есть две противоположные точки зрения.

Самая радикальная состоит в том, что вначале был хаос. Расширение ранней Вселенной происходило крайне анизотропно и неоднородно, но затем диссипативные процессы сгладили анизотропию и приблизили расширение к модели Фридмана – Леметра. Судьба неоднородностей весьма любопытна: если их амплитуда была большой, то неизбежно они должны были коллапсировать в черные дыры с массой, определяемой текущим горизонтом. Их формирование могло начаться прямо с планковского времени, так что во Вселенной могло быть множество мелких черных дыр с массами до 10^{-5} г. Однако С. Хокинг показал, что «мини-дыры» должны, излучая, терять свою массу, и до нашей эпохи могли сохраниться только черные дыры с массами более 10^{16} г, что соответствует массе небольшой горы.

Первичный хаос мог содержать возмущения любого масштаба и амплитуды; наиболее крупные из них в виде звуковых волн могли сохраниться от эпохи ранней Вселенной до эры излучения, когда вещество было еще достаточно горячим, чтобы испускать, поглощать и рассеивать излучение. Но с окончанием этой эры остывшая плазма рекомбинировала и перестала взаимодействовать с излучением. Давление и скорость звука в газе упали, вследствие чего звуковые волны превратились в ударные волны, сжимающие газ и заставляющие его коллапсировать в галактики и их скопления. В зависимости от типа исходных волн расчеты предсказывают весьма различную картину, далеко не всегда соответствующую наблюдаемой. Для выбора между возможными вариантами космологических моделей важной является одна философская идея, известная как *антропный принцип*: с самого начала Вселенная должна была

иметь такие свойства, которые позволили сформироваться в ней галактикам, звездам, планетам и разумной жизни на них. Иначе некому было бы заниматься космологией.

Альтернативная точка зрения состоит в том, что об исходной структуре Вселенной можно узнать не более того, что дают наблюдения. Согласно этому консервативному подходу, нельзя считать юную Вселенную хаотической, поскольку сейчас она весьма изотропна и однородна. Те отклонения от однородности, которые мы наблюдаем в виде галактик, могли вырасти под действием гравитации из небольших начальных неоднородностей плотности. Однако исследования крупномасштабного распределения галактик (в основном проведенные Дж. Пиблсом в Принстоне), кажется, не подтверждают эту идею. Другая интересная возможность состоит в том, что скопления черных дыр, родившихся в адронную эру, могли стать исходными флуктуациями для формирования галактик.

Открыта или замкнута Вселенная? Ближайшие галактики удаляются от нас со скоростью, пропорциональной расстоянию; но более далекие не подчиняются этой зависимости: их движение указывает, что расширение Вселенной со временем замедляется. В замкнутой модели Вселенной под действием тяготения расширение в определенный момент останавливается и сменяется сжатием (рис. 2), но наблюдения показывают, что замедление галактик происходит все же не так быстро, чтобы когда-либо произошла полная остановка.

Чем больше времени прошло от начала расширения, тем большая область становится доступной для наблюдения. В настоящее время свет приходит к нам от звезд, квазаров и скоплений галактик, удаленных на миллиарды световых лет, но в ранние эпохи наблюдатель мог видеть гораздо меньшую область Вселенной. В различные эпохи доминировали разные формы материи: хотя доминирует вещество атомных ядер (нуклонов), до этого, когда Вселенная была горячей, доминировало излучение (фотоны), а еще раньше – легкие элементарные частицы (лептоны) и тяжелые (адроны).

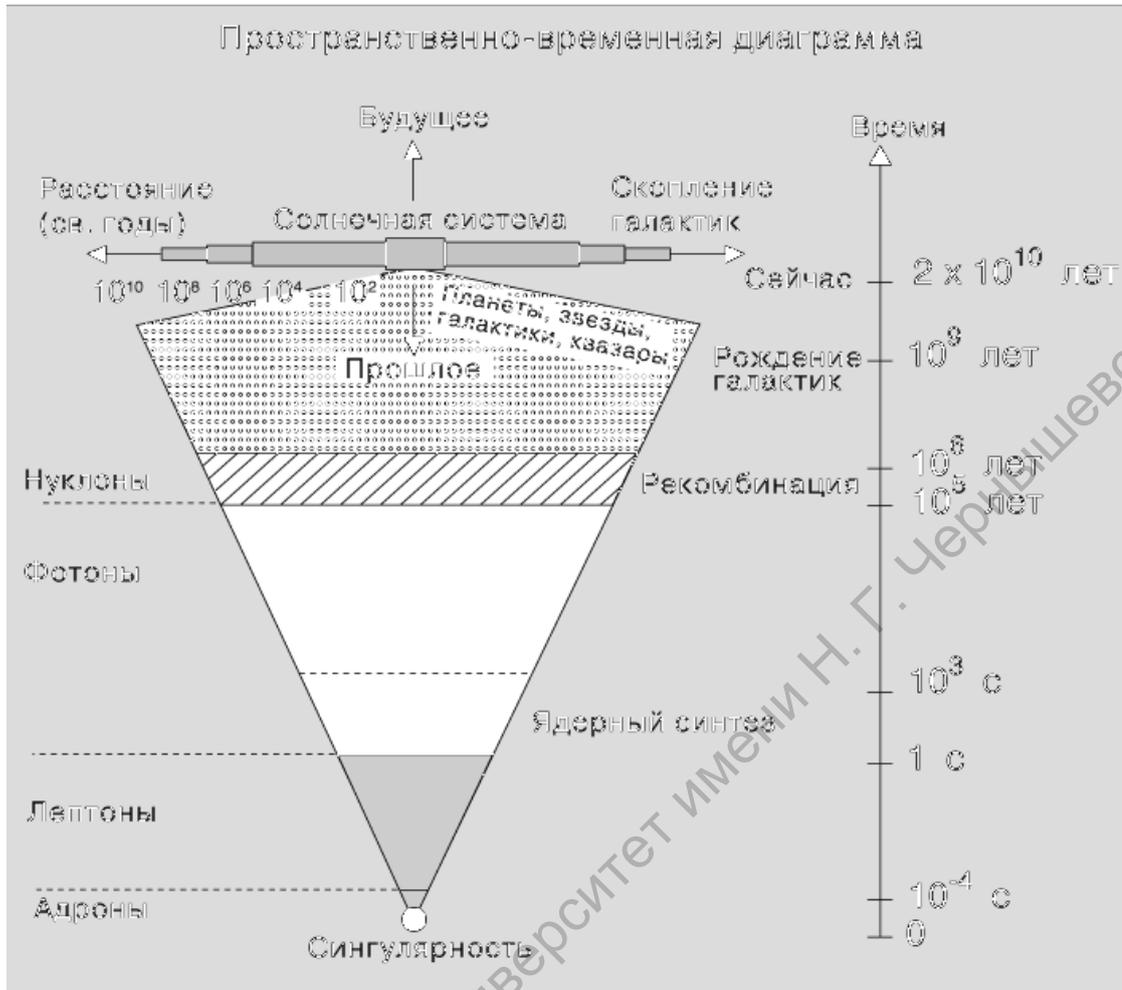


Рис. 5.2. Стандартная модель Большого взрыва: время отложено по вертикали, а расстояния – по горизонтали. Горизонтальные линии отмечают характерные моменты эволюции, а отсеченные ими треугольники показывают область Вселенной, доступную наблюдателю в этот момент

Чтобы Вселенная была замкнута, средняя плотность материи в ней должна превышать определенное критическое значение. Оценка плотности видимого и невидимого вещества весьма близка к этому значению.

Распределение галактик в пространстве весьма неоднородно. Наша Местная группа галактик, включающая Млечный Путь, Туманность Андромеды и несколько галактик поменьше, лежит на периферии огромной системы галактик, известной как Сверхскопление в Деве (Virgo), центр которого совпадает со скоплением галактик Virgo. Если средняя плотность мира велика и Вселенная замкнута, то должно было бы наблюдаться сильное отклонение от изотропного расширения, вызванное притяжением нашей и соседних галактик к центру Сверхскопления. В открытой Вселенной это отклонение незначительно. Наблюдения скорее согласуются с открытой моделью.

Большой интерес космологов вызывает содержание в космическом веществе тяжелого изотопа водорода – дейтерия, который образовался в ходе ядерных реакций в первые мгновения после Большого взрыва. Содержание дейтерия оказалось чрезвычайно чувствительно к плотности вещества в ту эпоху, а, следовательно, и в нашу. Однако «дейтериевый тест» осуществить нелегко, ибо нужно исследовать первичное вещество, не побывавшее с момента космологи-

ческого синтеза в недрах звезд, где дейтерий легко сгорает. Изучение предельно далеких галактик показало, что содержание дейтерия соответствует низкой плотности материи и, следовательно, открытой модели Вселенной.

10.4. Нерешенные проблемы космологии

Альтернативные космологические модели. Вообще говоря, в самом начале своего существования Вселенная могла быть весьма хаотична и неоднородна; следы этого мы, возможно, наблюдаем сегодня в крупномасштабном распределении вещества. Однако период хаоса не мог длиться долго. Высокая однородность космического фонового излучения свидетельствует, что Вселенная была очень однородна в возрасте 1 млн. лет. А расчеты космологического ядерного синтеза указывают, что если бы по истечении 1 с после начала расширения существовали большие отклонения от стандартной модели, то состав Вселенной был бы совсем иным, чем в действительности. Однако о том, что было в течение первой секунды, еще можно спорить. Кроме стандартной модели Большого взрыва, в принципе существуют и альтернативные космологические модели:

1. Модель, симметричная относительно материи и антиматерии, предполагает равное присутствие этих двух видов вещества во Вселенной. Хотя очевидно, что наша Галактика практически не содержит антивещества, соседние звездные системы вполне могли бы целиком состоять из него; при этом их излучение было бы точно таким же, как у нормальных галактик. Однако в более ранние эпохи расширения, когда вещество и антивещество были в более тесном контакте, их аннигиляция должна была рождать мощное гамма-излучение. Наблюдения его не обнаруживают, что делает симметричную модель маловероятной.

2. В модели Холодного Большого взрыва предполагается, что расширение началось при температуре абсолютного нуля. Правда, и в этом случае ядерный синтез должен происходить и разогревать вещество, но микроволновое фоновое излучение уже нельзя прямо связывать с Большим взрывом, а нужно объяснять как-то иначе. Эта теория привлекательна тем, что вещество в ней подвержено фрагментации, а это необходимо для объяснения крупномасштабной неоднородности Вселенной.

3. Стационарная космологическая модель предполагает непрерывное рождение вещества. Основное положение этой теории, известное как Идеальный космологический принцип, утверждает, что Вселенная всегда была и останется такой, как сейчас. Наблюдения опровергают это.

4. Рассматриваются измененные варианты эйнштейновской теории гравитации. Например, теория К. Бранса и Р. Дикке из Принстона в общем согласуется с наблюдениями в пределах Солнечной системы. Модель Бранса – Дикке, а также более радикальная модель Ф. Хойла, в которой некоторые фундаментальные постоянные изменяются со временем, имеют почти такие же космологические параметры в нашу эпоху, как и модель Большого взрыва.

5. На основе модифицированной эйнштейновской теории Ж. Леметр в 1925 построил космологическую модель, объединяющую Большой взрыв с длительной фазой спокойного состояния, в течение которой могли формироваться галактики. Эйнштейн заинтересовался этой возможностью, чтобы обосновать свою любимую космологическую модель статической Вселенной, но когда было открыто расширение Вселенной, он публично отказался от нее.

10.5. Темная энергия

Несмотря на впечатляющие успехи космологии, явление разбегания галактик, происходящее со скоростью, растущей по мере удаления от некоего центра и вместе с тем от наблюдателя, не получило пока разумного объяснения. Астрофизики наших дней пытаются объяснить этот феномен существованием в природе новой, ранее не известной субстанции – тёмной энергии-материи.

Всемирное антитяготение – новый физический феномен, открытый в астрономических наблюдениях на расстояниях в 5-8 млрд. световых лет. Антитяготение проявляет себя как космическое отталкивание, испытываемое далёкими галактиками, причём отталкивание сильнее гравитационного притяжения галактик друг к другу. По этой причине общее космологическое расширение происходит с ускорением.

Общая картина распространения света позволяет выяснить, при каких условиях в расширяющемся мире можно измерять не только скорости, но и ускорения галактик. Таким путем было найдено³⁹, что до расстояний примерно в 7 млрд. световых лет эти ускорения положительны: скорость удаления галактик возрастает со временем. Но на еще более далеких расстояниях ускорение, как оказалось меняет знак – там оно отрицательно и, значит, на этих сверхбольших расстояниях скорость разбегания галактик уменьшается.

Антитяготение создаётся не галактиками или какими либо другими телами природы, а не известной ранее формой энергии-массы наблюдаемой вселенной. На макроскопическом уровне тёмная энергия описывается как особого рода непрерывная среда, которая заполняет всё пространство мира; эта среда обладает положительной плотностью и отрицательным давлением.

Физическая природа тёмной энергии и её микроскопическая природа неизвестны – это одна из самых острых проблем фундаментальной науки наших дней (см. Приложение 2).

³⁹ А.М. Черепашук, А.Д. Чернин. Современная космология – наука об эволюции Вселенной // В защиту науки (отв. ред. Э.П. Кругляков); Комиссия по борьбе с лженаукой и фальсификацией науч. исслед. РАН. –М.: Наука, Бюлл. №4. – 2008, с. 187. (Выпуски бюллетеня «В защиту науки» есть в Интернете).

РАЗДЕЛ 6. ФИЗИКА И СОЗНАНИЕ

11. Некоторые вопросы познания в современной физике

В этом разделе речь пойдет о познавательных возможностях современной физики, направленных главным образом на объяснение явлений микромира, и проблеме объяснения феномена сознания с помощью физики.

11.1. Кошка Шредингера или как может существовать стабильный мир на нестабильном основании

Что дает квантовая теория для познания

Классическая физика в согласии со здравым смыслом рассматривает объективный мир существующим вне наблюдателя. Это верно не только для механики Ньютона, но и для подходов в электродинамике и теории относительности. Процессы происходят независимо от нас, да и сами мы телесно являемся частью этого мира и, следовательно, подчиняемся его законам. Квантовое описание является точным, хотя и радикально отличающимся от классического. Кроме того, вероятностный характер описания не возникает на микроуровне, т.к. движение атомов, молекул происходит детерминировано, а появляется, в результате некоторого загадочного крупномасштабного действия по переводу проявлений микромира на язык, доступный нашим ощущениям. Само существование твердых тел, упругость и другие свойства материалов, химические свойства, цвет вещества, устойчивость наследственности – эти и многие другие знакомые нам явления невозможно объяснить без привлечения квантовой теории.

Возможно, что и феномен сознания есть нечто, что невозможно объяснить без привлечения квантовых представлений. Для того чтобы основательно углубиться в философские вопросы и понять, как ведет себя наш мир и каково строение «разума», т.е. «нас самих», следует ближе познакомиться с возможностями квантовой теории. И здесь существуют разные точки зрения. Последователи Нильса Бора утверждают, что объективной картины реального мира не существует. Самого по себе ничего нет, а реальность возникает только в связи с результатами измерений. Квантовая механика нужна только как вычислительная процедура. Позитивистский взгляд иной: объективная физическая реальность может быть описана квантовым состоянием. Существует точное уравнение Шредингера, которое описывает полностью причинно обусловленную эволюцию этого состояния. Сам измерительный прибор, в конечном счете, тоже состоит из квантовых составляющих и поэтому должен эволюционировать в соответствии с уравнением Шредингера. Можно предположить, что и сами наблюдатели построены из крохотных квантовых частиц. Является ли сознание необходимой частью процесса измерения? Лишь немногие отвечают на этот вопрос положительно.

Атомы могли излучать свет только определенного набора частот, в виде четких спектральных линий. Но система полей и частиц в классической теории должна быть нестабильной: энергия «перетекает» от частиц к полям, которые имеют бесконечно большое число степеней свободы. Так что, как показали в свое время Релей и Джинс (1900 г.), вся энергия частиц должна быть до конца «высосана» полем. Этот физически абсурдный результат получил название «ультрафиолетовой катастрофы», при которой энергия безостановочно перетекает во все более высокочастотные колебания поля, в то время как в действительности природа не ведет себя так расточительно.

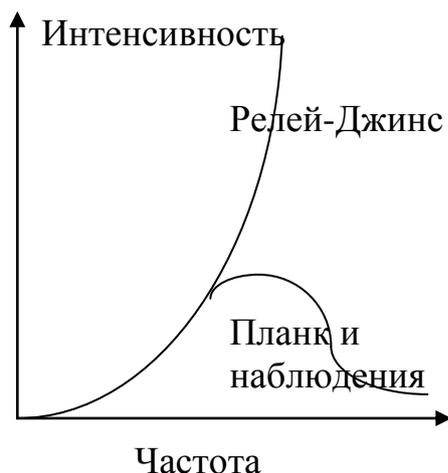


Рис.6.1. Расхождение между интенсивностью излучения абсолютно черного тела в классической теории (Релей-Джинс) и наблюдаемой интенсивностью привели Планка к кванту действия

В отличие от предсказаний Релея и Джинса, максимальное значение энергии при данной температуре приходится на определенную длину волны и поэтому цвет нагретого тела зависит от его температуры.

Эксперимент с двумя щелями

Рассмотрим «архетипичный» квантово-механический эксперимент, при котором пучок электронов, света или других «волн-частиц» направляется сквозь две узкие щели на расположенный позади них экран. Когда открыта не одна, а две щели, наблюдается волнообразное распределение интенсивности. Картина освещенности при двух щелях сильно отлична от той, которая наблюдается при одной щели. В тех точках, где освещенность максимальна, она превосходит освещенность при одной щели не в два, а в четыре раза. В точках минимума она падает до нуля (при двух щелях). Как могло случиться, что, предоставив фотону альтернативный маршрут, мы в действительности воспрепятствовали его прохождению по любому из маршрутов?

Если принять в качестве «размера» фотона длину его волны, то в масштабах фотона вторая щель находится от первой на расстоянии около 300 размеров фотона. А ширина каждой щели составляет около двух размеров фотона. Каким образом фотон, проходя через одну из двух щелей, узнает о том, открыта или

закрыта другая щель? В некотором смысле каждая частица проходит сразу через обе щели и интерферирует сама с собой (при малой интенсивности света).

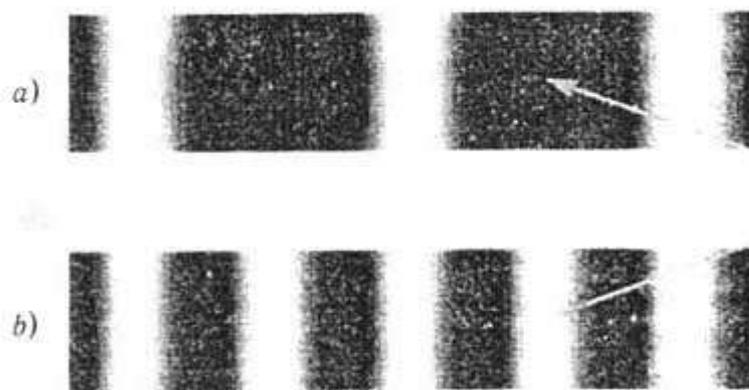


Рис. 6.2. Тени отбрасываемые перегородкой с (а) четырьмя и (б) двумя параллельными щелями (по книге Д. Дойча «Структура реальности», рис. 2.7)

Бор, по-видимому, считал, что состояние системы микрочастиц между измерениями не обладает настоящей физической реальностью, а действует лишь как свод знаний некоего субъекта о рассматриваемой системе. Тогда волновая функция превращается во что-то субъективное или целиком существует в уме физика. Поэтому Бору пришлось рассматривать мир на классическом уровне как действительно обладающий объективной реальностью. Но в состояниях на квантовом уровне, которые, казалось бы, лежат в основе всего, никакой реальности он не усматривал.

Такая картина была неприемлема для Эйнштейна, который был глубоко убежден в том, что объективный физический мир должен действительно существовать, даже на микроскопических масштабах квантовых явлений. В своих многочисленных дискуссиях с Бором Эйнштейн пытался доказать, но неудачно, что квантовой картине присущи внутренние противоречия, и что за квантовой теорией должна стоять какая-то более глубокая структура. Возможно, вероятностное поведение квантовых систем служит проявлением статистических эффектов более малых компонентов системы, о которых мы не располагаем непосредственным знанием. Последователи Эйнштейна, в особенности Давид Бом, развили высказанную им идею о скрытых переменных, согласно которой параметры, точно определяющие систему, не доступны нам непосредственно, и квантовые вероятности возникают из-за того, что значения этих параметров неизвестны до измерения. Согласуется ли теория скрытых переменных со всеми наблюдаемыми фактами квантовой физики? Похоже, что ответ на этот вопрос должен быть утвердительным, но только если эта теория по существу нелокальна в том смысле, что скрытые параметры должны иметь возможность мгновенно влиять на элементы системы в сколь угодно далеких областях. Такая ситуация не понравилась бы Эйнштейну, особенно в связи с возникающими трудностями в специальной теории относительности.

Кошка Шредингера

Любая часть измерительного устройства сама является частью физического мира и состоит из тех же самых кантовомеханических компонент, поведение которых должен исследовать измерительный прибор. В известном смысле измерение составная система производит над собой. Противоречие в сказанном особенно ярко проявляется в мысленном эксперименте, предложенном Эрвином Шредингером.

Представьте себе герметичный контейнер, через который ни внутрь, ни наружу не проходит ни одно внешнее воздействие. Предположим, что внутри контейнера находится кошка, а также устройство, приводимое в действие (запускаемое) некоторым квантовым событием. Если это событие происходит, то устройство разбивает ампулу с синильной кислотой, и кошка гибнет. Если событие не происходит, кошка продолжает жить. В первоначальной версии Шредингера квантовым событием, запускающим устройство, был распад радиоактивного атома. Выберем вслед за Пенроузом в качестве квантового события, запускающего устройство, фотон, который, попадая в фотоэлемент, приводит его в действие. Этот фотон отражается от полупосеребренного зеркала. Отражение от зеркала расщепляет волновую функцию фотона на две части, одна из которых отражается, а вторая проходит сквозь зеркало. Для внешнего наблюдателя кошка действительно есть не что иное как линейная комбинация живой и дохлой кошек, и только когда контейнер будет, наконец, вскрыт, вектор состояния кошки коллапсирует в вектор одного из этих двух состояний. С другой стороны для внутреннего наблюдателя (защищенного надлежащим образом от действия синильной кислоты) вектор состояния кошки коллапсировал бы гораздо раньше и линейная комбинация внешнего наблюдателя не имела бы смысла.

Различные точки зрения на существующую квантовую теорию

Нередко говорят, что трудности с интерпретацией исчезли бы, если бы мы более полно учли требования опыта. Действительно, полностью изолировать содержимое контейнера от внешнего мира невозможно. Следовательно, вектор состояния будет искажен. Можно прийти и к другой точке зрения о том, что законы квантовой линейной суперпозиции неприменимы к сознанию (речь идет о двух наблюдателях). Так Э. Вигнер предположил, что линейность уравнения Шредингера может нарушаться для существ, наделенных сознанием (или просто живых существ), и это уравнение подлежит замене на некоторую нелинейную процедуру, согласно которой та или иная из альтернатив должна быть отброшена.

Существует другая точка зрения, связанная в чем-то с предыдущей, которая сводит роль сознания к другому (противоположному) пределу. Она была выдвинута Джоном Уилером в 1938 г. и получила название соучаствующей (партиципаторной) вселенной. Эволюция сознательной жизни на нашей планете обусловлена подходящими мутациями, происходившими в различное время. Предположительно это были квантовые события, поэтому они могли бы сосуществовать как линейные суперпозиции до тех пор, пока не довели эволюцию до мыслящих существ, само существование которых зависит от всех «правиль-

ных» мутаций, имевших место в свое время. Именно наше присутствие, согласно этой идее, вызывает к жизни наше прошлое.

Другая точка зрения, тоже по-своему логичная, но приводящая к не менее странной картине – так называемая картина множественности миров, впервые выдвинутая Хью Эвереттом (1957). Здесь мир внутреннего наблюдателя сопоставляется с миром внешнего. Трудность этой гипотезы состоит в том, что нет разработанной теории сознания, хотя и экономичность гипотезы тоже под вопросом (экономия мышления, по Маху? – А.Р.).

Вывод из сказанного, который мы делаем вместе с Пенроузом, может быть таким. На субмикроскопическом уровне квантовые законы действительно работают, но на уровне крикетных шаров действует классическая механика. Где-то между ними находится закон, который нам непременно понадобится, если мы хотим понять, как функционирует наш разум.

Кроме того, следует признать, что, несмотря на безупречную работу ее математического аппарата, объяснение квантово-механических (микроскопических) событий не является единственным и представляет собой проблему.

11.2. Законы сохранения в физике

Так называют физические закономерности, согласно которым численные значения некоторых физических величин не изменяются со временем в любых процессах или в определенном классе процессов. Законы сохранения дают иногда возможность сделать заключение о поведении во времени системы, для которой неизвестен или слишком сложен описывающий ее динамический закон. Важнейшими ЗС, справедливыми для любых изолированных систем, являются законы сохранения энергии, импульса, углового момента, электрического заряда. О законах сохранения упоминалось и раньше. Здесь подводится итог сказанному.

Большое значение ЗС имеют в квантовой теории, в частности в теории элементарных частиц. Они определяют правила отбора, согласно которым невозможны те реакции, которые ведут к нарушению ЗС. Перечисленные ЗС справедливы в физике макромира (см. ниже материал о теореме Нётер). В дополнение к ним в теории элементарных частиц возникло много специфических ЗС, позволяющих интерпретировать наблюдаемые на опыте правила отбора. Таков, например, закон сохранения барионного числа, выполняющийся с очень высокой точностью во многих видах фундаментальных взаимодействий. Существуют и приближенные ЗС, выполняющиеся в одних видах взаимодействий и нарушающиеся в других. Например, закон сохранения странности, изотопического спина⁴⁰, пространственной четности строго выполняются в процессах,

⁴⁰ Изотопический спин I , также называемый изобарическим спином, или, изоспином – это свойство, которое является характерным для семейств связанных субатомных частиц, отличающихся преимущественно по величине их электрического заряда. Семейства подобных частиц известны как изоспиновые мультиплеты с числом членов $2I+1$: семейства с двумя частицами называют дублетами ($I=1/2$), семейства с тремя частицами - триплетами, и так далее.

протекающих за счет сильного взаимодействия, но нарушаются в процессах слабого взаимодействия. Электромагнитное взаимодействие нарушает закон сохранения изотопического спина. ЗС тесно связаны со свойствами симметрии физических систем. При этом симметрия понимается как инвариантность физических законов относительно некоторой группы преобразований входящих в них величин. Т.о., если известны свойства симметрии системы, можно найти для нее ЗС и наоборот.

Так сохранение энергии связано с однородностью времени, т.е. с инвариантностью физических законов относительно изменения начала отсчета времени. Сохранение импульса и момента связаны соответственно с однородностью пространства (инвариантность относительно пространственных сдвигов) и изотропностью пространства (инвариантность относительно вращений пространства). Поэтому проверка механических ЗС является проверкой соответствующих фундаментальных свойств пространства-времени. Долгое время считалось, что кроме перечисленных элементов симметрии пространство-время обладает зеркальной симметрией, т.е. инвариантно относительно обращения (инверсии) времени. Тогда должна была бы сохраняться пространственная четность. Однако в 1957 г. было экспериментально обнаружено несохранение четности в слабом взаимодействии, поставившее вопрос о пересмотре взглядов на глубокие свойства геометрии мира. В связи с развитием теории гравитации намечается дальнейший пересмотр взглядов на симметрию пространства-времени и фундаментальные ЗС (в частности на законы сохранения энергии и импульса).

Теорема Нётер утверждает, что для всякой физической системы, уравнения движения которой могут быть получены из вариационного принципа, каждому однопараметрическому непрерывному преобразованию, оставляющему вариационный функционал инвариантным, отвечает один закон сохранения. Теорема позволяет выписать сохраняющуюся величину. Установлена в работах ученых гёттингенской школы Давида Гильберта, Феликса Клейна, и Эмми Нётер. Теорема Нётер представляет собой самое универсальное средство, позволяющее находить законы сохранения в лагранжевой классической механике, теории поля, квантовой теории и т.д.

11.3. Аксиоматическое построение физических теорий

Аксиоматическая теория – это теория, результаты которой выступают как строгие следствия единой системы фундаментальных физических представлений – аксиом. В отличие от математики физика не сразу строится в виде аксиоматического формализма. Если в математике система объектов и система

Составляющие частицы атомных ядер, нейтрон и протон, формируют изоспиновый дублет, так как они отличаются только по электрическому заряду и второстепенным свойствам. О них обычно говорят как о различных версиях, или зарядовых состояниях того же самого объекта, названного нуклоном. Изоспин нуклона равен одной второй. Величину изоспина найдем, вычитая единицу из числа членов в его мультиплете и затем делим результат на два. Главное значение изоспина в физике состоит в том, что, когда частицы сталкиваются или распадаются под влиянием сильного взаимодействия, их изоспин сохраняется.

аксиом для них прямо берутся в качестве исходных данных теории, то в физике исходят из определенного запаса экспериментальных фактов и некоторой совокупности закономерностей, подмеченных в этих фактах. Участники изучаемой области явлений могут существенно различаться. Эти участники сначала описываются различными теоретическими схемами, которые часто не вполне согласуются между собой и, кроме того, являются приближенными. На таком этапе теория еще не подготовлена к ее представлению в строгой аксиоматической форме.

Лишь когда установлены главные закономерности, управляющие данной областью явлений, выяснена степень их общности и точные закономерности отделены от приближенных, становится целесообразным выразить их в виде системы фундаментальных аксиом и представить основные результаты теории как строгие следствия из этой системы аксиом. Таким образом, «если в математике мы аксиоматизируем, чтобы понять, то в физике нам нужно сначала понять, чтобы аксиоматизировать» (Ю. Вигнер).

Последовательность «операций» покажем на примере формирования квантовой теории поля, которое происходило в середине 1950-х гг. Сначала выбираются исходные физические объекты, в терминах которых и идет дальнейшее развитие теории. Затем находится (а иногда и строится заново) математический аппарат, пригодный для описания объектов. И, наконец, последние два этапа – формулировка системы аксиом и вывод следствий из них.

Любая физическая теория как квантовая, так и классическая может быть представлена в форме локальных наблюдаемых. В основе АКТП (аксиоматической квантовой теории поля) лежат 3 аксиомы, которые являются одними и теми же для различных направлений этой теории.

1. Аксиома релятивистской инвариантности (неизменность физических законов относительно преобразований Лоренца) для инерциальных систем;
2. Аксиома локальной причинности требует, чтобы некое событие, происшедшее в физической системе, могло повлиять на поведение системы лишь в моменты времени, следующие за этим событием;
3. Аксиома спектральности, которая утверждает, энергии всех допустимых состояний системы (ее спектр энергий) должны быть положительны. Эта аксиома утверждает фундаментальный факт положительности масс всех частиц, подтверждаемый всей физической практикой.

12. Хватит ли арсенала физики для описания жизни и сознания?

12.1. В рамках традиционной науки

Жизнь и сознание. Достаточен ли физический подход?

Анализируя этот вопрос, один из создателей квантовой механики Эрвин Шредингер («Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки») считает, что «деятельность живой материи, хотя и основана на законах физики, установленных к настоящему времени, но, по-видимому, подчиняется до сих пор не известным другим законам физики, которые, однако, как только они будут откры-

ты, должны будут составить такую же неотъемлемую часть науки как и первые». С точки зрения Шредингера, «*жизнь* – это упорядоченное и закономерное поведение материи, основанное не только на одной тенденции переходить от упорядоченности к неупорядоченности, но и частично на существовании упорядоченности, которая поддерживается все время». И еще. «Когда мы считаем материю живой? Тогда, когда она продолжает «делать что-либо», двигаться, участвовать в обмене веществ с окружающей средой и т.д. - все это в течение длительного отрезка времени, чем, по нашим ожиданиям, могла бы делать неодушевленная материя в подобных условиях».

«Мы вправе предполагать, что живая материя подчиняется новому типу физического закона. Или мы должны назвать его сверхфизическим законом? Нет, я не думаю этого. Новый принцип – подлинно физический закон: на мой взгляд, он не что иное, как опять-таки принцип квантовой теории».

«В основе организма лежит «твердое тело» - аперриодический кристалл, образующий наследственное вещество, не подверженное воздействию беспорядочного теплового движения». Это «не грубое человеческое изделие, а прекраснейший шедевр, когда либо созданный по милости господней квантовой механики».

Из приведенных цитат следует, что Э. Шредингер считает, что физика пока не может объяснить жизнь. Способна ли она объяснить, по крайней мере, компонент жизни - сознание? Этим вопросом занимался Р. Пенроуз в книге «Новый ум короля», которая имеет характерный подзаголовок «О компьютерах, мышлении и законах физики».

The Emperor's New Mind – название книги Пенроуза перекликается с названием книги Г.-Х. Андерсена (1805-1875), двухсотлетие которого широко отмечалось не так давно, The Emperor's New Clothes. В своей книге (точнее - во вступлении к ней), Пенроуз утверждает, что явление сознания не может быть описано в рамках современной физики. «Однако я ни в коем случае не утверждаю, - пишет он, - что понимание этого феномена невозможно в рамках этого подхода – просто современная наука еще не достигла уровня, необходимого для решения такой задачи».

Пенроуз ставил перед собой 2 цели.

Первая – стремление показать, что математическое мышление – а, следовательно, и умственная деятельность в целом – не может быть полностью описано при помощи «компьютерной» модели разума. Вторая цель – показать, что сегодня в физической картине мира есть существенное «белое пятно», а именно: отсутствует «мостик» между субмикроскопическим уровнем квантовой механики и макромиром классической физики. Теория, которая в будущем восполнит этот пробел, должна будет в значительной степени помочь понять физические основы феномена сознания. Простор для нанотехнологий (?! – А.Р.).

12.2. Вненаучные подходы

Некоторые альтернативные точки зрения на возможности объяснения феномена сознания.

Рассмотрим две позиции по этому вопросу. Одна из них принадлежит Ричарду Л. Томпсону и изложена им в книге «Механистическая и немеханистическая наука». Вторая принадлежит отечественным исследователям этой проблемы и представлена в работах Л. В. Лескова. Начнем с первой.

Описание явлений природы, выраженное в числах и формулах, Р. Томпсон называет механистическим. Он критикует «механистический» подход за отрывочность, оторванность одних объяснений от других (см. пункт об аксиоматизации, изложенный выше, из которого следует, что это не совсем так). Он считает, что в природе или в устройстве искусственного интеллекта, должно существовать «нечто», способное:

- 1) различать среди разнообразных материальных образований определенные, в высшей степени абстрактные организованные структуры;
- 2) устанавливать связи между сознанием и этими материальными образованиями. В частности оно должно изменять содержание сознания в соответствии с изменениями, которые претерпевают данные абстрактные свойства с ходом времени и в процессе трансформации материальных образований.

Автор считает, что это «нечто» представляет собой какое-то совершенно неизвестное современной науке свойство природы. Речь, как пишет далее Томпсон, идет о сознании, а попытки современной науки объяснить сознание прямо или косвенно опираются на аналогию между человеческим мозгом и компьютером. Заметим, что в психологии подобный подход называют метафорой компьютера.

Не случайно Р. Томпсон обращается к одному из направлений современной психологии, возникшему ещё в первой половине XX века, точнее к функциональному бихевиоризму. В рамках бихевиоризма естественнее представляются рассуждения об искусственном интеллекте, поскольку феномен естественного интеллекта там не используется.

Кроме того, цитируются слова лауреата Нобелевской премии Ю. Вигнера (Wigner, Eugene Paul), который привлекал принципы современной физической теории для оправдания интерактивной модели сознания. Он утверждал, что в физике причинная связь никогда не имеет одностороннего характера. Следовательно, если сознание реально, то оно должно воздействовать на материю. Поэтому, считает Вигнер, современные законы физики по меньшей мере неполны, пока они не распространяются на сферу ментальных явлений. Правильнее было бы сказать, что они неточны, причем их неточность только возрастает с возрастанием роли, которую играет жизнь в рассматриваемых явлениях.

Рассмотрим 2-ую концепцию, активно поддерживаемую профессором Л. В. Лесковым из Московского государственного университета, написавшим раздел о физической картине мира в учебном пособии по истории и философии науки⁴¹. Он начинает с концепции физического вакуума, из которого согласно

⁴¹ Философия науки / под ред. С.А. Лебедева: Учебное пособие для вузов. – М.: Академический проект; Трикста, 2004. – 736 с. Философия современного естествознания: Учебное пособие для вузов /

теории Большого взрыва родилась Вселенная. Это не тот вакуум, который был открыт в 1644 г. учениками Галилея Э. Торричелли и В. Вивiani. Это совсем другой пласт реальности – физический или квантовый вакуум, открытый (теоретически) П. Дираком в 1928 г. Уйдя в область отрицательных энергий, где заняты все уровни фермионов, П. Дирак считал, что находящиеся на них электроны образуют квантовый вакуум (т.н. «вакуумное море» Дирака). Однако, если на это «море» направить импульс гамма-излучения, то получившие его электроны приобретут положительную энергию и перейдут в реальный мир. В «море» останется «дырка».

В 1980 г. А.Е. Акимов, как считает он сам и Л.В. Лесков, предложил новую теоретическую модель квантового вакуума. Предполагается, по этой гипотезе, что Вселенная наполнена свертками из круговых волн электронов и позитронов, нейтрино и антинейтрино. Такая свертка обладает нулевым зарядом, нулевой массой (?) и нулевым спином. Ее Акимов назвал фитоном. Фитонная модель, по утверждению ее приверженцев, позволяет по-новому подойти к фундаментальным взаимодействиям. Так электромагнитное поле рассматривается как результат зарядовой поляризации физического вакуума, когда электростатическое поле зарядов уменьшит взаимную нейтрализацию электронов и позитронов в фитонах и эти заряженные частицы начнут раскачиваться относительно положения равновесия, порождая электромагнитное поле.

Если на квантовый вакуум действует не заряд, а масса, то система фитонов приобретет продольную спиновую ориентацию, которая будет соответствовать гравитационному полю. Таким образом, имеет место принципиально новый вид фундаментального взаимодействия – кручение вакуума. Этот тип взаимодействий называется торсионным (*torsion* – кручение, англ.).

Существование торсионных полей постулировал в 1922 г. Э. Картан. Спин он не учитывал. Поэтому он не мог правильно оценить константы взаимодействий. Эта задача была решена, по мнению Лескова, в 1980-х гг. Г.И. Шиповым с использованием геометрии Г.Р. Риччи (ученика Римана), которая содержала угловые координаты.

Физические свойства торсионных полей уникальны (если рассуждения верны! – А.Р.). Во-первых, взаимодействие торсионных квантовых вихрей носит не энергетический, а информационный (? – А.Р.) характер и, следовательно, на них не распространяется вытекающий из теории относительности принцип максимальной скорости света (существующий для передачи энергии). Их интенсивность не обратно пропорциональна квадрату расстояния. А посему это идеальное средство связи на межзвездных расстояниях. Здесь профессор Лес-

Под общ. ред. проф. С.А. Лебедева. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 2004. – 304. См. также: Л.В. Лесков. Современная научная картина мира // Основы философии науки. Учебное пособие для вузов / Под ред. С. А. Лебедева. - Москва: Академический Проект 2005; Екатеринбург: Деловая книга 2005, С. 269-270.

Критические замечания по поводу изложения физической картины мира в этих книгах см. в журнале «Природа» №3 за 2006 г. в статьях Э.П. Круglyакова «Так куда же мы идем? или Вперед, в средневековье!» и Ю.Д. Манина «Семантический вакуум».

ков ссылается на Н.А. Козырева, М.М. Лаврентьева и А.Ф. Пугача, якобы ставивших эксперименты, подтверждающие указанные положения.

Объясняется и инерция тела - возмущением «фитонного моря», приводящим к его поляризации по массе (? – А.Р.). Отсюда и равенство инертной и гравитационных масс, имеющих «общий знаменатель» в вакуумном море (искривление и кручение физического вакуума). В эксперименте наблюдаются (по словам Л.В. Лескова) электроторсионные поля.

При использовании упомянутых учебников, написанных преподавателями МГУ, подрастающая научная элита будет получать недостоверную информацию о современной картине мира. Не берусь за подробный анализ гипотезы торсионных полей, но одно бросается в глаза; торсионные поля, проникающие, по мысли их апологетов, сквозь Солнце, звезды, почему-то задерживаются в головах людей. Механизм такого взаимодействия с мозгом не раскрывается, зато постулируется чуть ли не бесконечная скорость распространения и способность передавать мысли на расстояние (А.Е. Акимов). Таким образом, одновременно «решаются» и проблемы сознания, мышления, обмена информацией без технических средств. Проблема явно выходит за рамки физики, охватывая психологию и другие науки. Чем не панацея? Кстати, прекрасный пример псевдонаучного подхода, когда предлагается лекарство сразу от всех «болезней» познания. Причем, и это характерно для деятельности псевдоученых, дело не ограничивается одной отраслью науки. Казалось бы, это хорошо, когда речь идет о междисциплинарных исследованиях. Но ... настораживает легкость необыкновенная и отсутствие детальной аргументации. Ссылаются правда на то, что теорию торсионных полей разработал Г.И. Шипов. Настораживает однако то, что он в своей последней книге продемонстрировал не интерпретацию своих прежних расчетов, а апелляцию к ... кришнаизму. Это один из любимых приемов псевдонаучного подхода – уход от рационального объяснения в пользу иррационального, мистического. И в этом плане оба альтернативных подхода (Р. Томпсона и Л.В. Лескова) похожи.

Можно заметить, что эйфория, связанная с торсионными полями в изданиях по философии науки постепенно сходит на нет. Так в учебном пособии 2006 года в разделе, посвященном физической картине мира, торсионные поля только названы, но их содержание не раскрыто. А в учебнике 2006 года этот раздел отдан уже другому физическому (Л.А. Грибову, который в отличие от автора прежних выпусков Л.В. Лескова, торсионными полями не увлекается и излагает этот раздел с традиционных для физической науки позиций)⁴². «Красивая» мечта о торсионных полях, палочка-выручалочка исчезла, по крайней мере, из учебников по философии науки, ввиду своей явной мифологичности, недоказанности и, конечно, не в последнюю очередь, под влиянием критики авторитетных ученых. Поэтому пользоваться учебными пособиями по философии науки под ред. С.А. Лебедева лучше последних лет издания (после 2006 г.). Правда и самих апологетов торсионных полей (А.Е. Акимова и Л.В. Лескова) уже нет в живых.

⁴² Введение в историю и философию науки : учебное пособие для вузов / под ред. С. А. Лебедева. 4-е изд., перераб. и доп. М., 2006. 736 с.; Философия естественных наук : учебное пособие для вузов / под ред. С. А. Лебедева. М., 2006. 560 с.

Есть основания думать замечает Л.В. Лесков (и здесь у нас нет причин ему возразить, поскольку в данном вопросе этот талантливый физик и популяризатор стоит на научных основах), что именно сложные структуры квантового вакуума и есть та первооснова, которая определяет свойства мира в целом. Основываясь на этой идее, Уиллер оценил минимальную энергию флуктуаций квантового вакуума. Для этого он использовал планковские масштабы и получил $E=10^{95} \text{ г/см}^3 = 10^{116} \text{ эрг/см}^3$. Это позволило утверждать, что наш мир погружен в океан энергии, а наблюдаемые события нашего мира – лишь рябь на его поверхности.

Комментарий. Рассуждения о квантовом вакууме существовали до гипотезы торсионных полей и вошли багаж современной физики. Торсионные поля как модель квантового вакуума – не признана пока современным физическим сообществом. Так лауреат Нобелевской премии В.Л. Гинзбург, говорил об этом спокойно, как о надувательстве и журил Л.В. Лескова, которого он считает серьезным ученым, за то, что тот поддался на «провокацию». По-видимому, ближайшее будущее расставит все по своим местам. Но знать о такой дискуссии надо.

РАЗДЕЛ 7. КОНЦЕПЦИИ ТЕХНИКИ

Природному Вселенная тесна,
Искусственному замкнутость нужна.
И. В. Гете

13. История, закономерности и социальная роль техники

Слово «техника» происходит от греческого слова «техн'э» - искусство, мастерство, умение. Это система искусственных органов деятельности общества, развивающаяся путем исторического процесса опредмечивания в природном материале трудовых функций, навыков и знаний, путем познания сил и закономерностей природы. Последнее прочно связывает технику с физикой, а также с социальными науками. Техника (вместе с людьми, создающими ее и приводящими в действие) образует составную часть производительных сил общества и является показателем тех общественных отношений, при которых совершается труд, составляет материальный базис каждой общественной формации.

Техника – 1)совокупность средств человеческой деятельности; 2)способ исполнения.

Технология (зап.) – приложение научного знания к практическим целям человеческой жизни или изменение человеческого окружения.

Технология (росс.) – совокупность методов изменения состояния (материала).

Современную технику (Т.) можно разделить на следующие функциональные отрасли:

производственная техника, Т. транспорта и связи, Т. научных исследований, военная Т., Т. процесса обучения, Т. культуры и быта, медицинская техника и Т. управления.

Техника может быть пассивной - мосты, туннели, производственные помещения, железные дороги, средства распространения информации (телефон, радио, телевидение) и активной - орудия физического и умственного труда, а также жизнедеятельности человека (очки, слуховые аппараты, протезы), машины в производстве, транспорте, военном деле, аппаратура управления машинами, производственными, социальными и экономическими процессами.

Закономерности техники не сводимы к социально-экономическим закономерностям. Исходным пунктом в социологическом исследовании развития техники выступает анализ ее взаимоотношений с человеком в процессе труда.

История техники может быть подразделена на три этапа: орудия ручного труда (инструменты), машины (на уровне механизации), автоматы (машины на уровне автоматизации).

13.1. Краткая история техники: основные этапы и идеи

Речь пойдет о развитии во времени систематических методов изготовления вещей. На Западе более принят термин «технология» - комбинация греческого *technē*, «искусство, ремесло» и «*logos*» «слово, речь», причем, этот термин первоначально применялся к изящным искусствам, и лишь впоследствии – и к прикладным. В Англии термин «технология» появился в 17-ом столетии для обозначения прикладных искусств. К началу 20-ого столетия термин охватил растущий диапазон средств, процессов, и идей в дополнение к инструментам и машинам (механизмам).

История техники – это также и история развития человека и общества. Используя свои рациональные способности по изменению окружающей среды, человек столкнулся и с другими проблемами, решение которых непосредственно не требовалось для выживания и производства богатства

Наше рассмотрение будет включать три стороны: социальная потребность, социальные ресурсы, и поддерживающий социальный идеал. Отсутствие любого из этих факторов ставит под сомнение техническое развитие.

Другой аспект технологии - способ передачи технологических новшеств. Это – трудно уловимая проблема, и необходимо принять явление одновременного или параллельного изобретения в случаях, в которых нет достаточных свидетельств преемственности. Механизм передачи новшеств был чрезвычайно улучшен в последние столетия с помощью прессы и других средств связи и путешествий к источнику новшеств. Традиционно, однако, главный способ передачи был связан с географическим перемещением изделий и мастеров, их изготовивших. Важно, что, будь то перемещение ремесленников ранних цивилизаций или творцов немецкой ракеты, чье опытное знание перешло как к Советскому Союзу, так и к Соединенным Штатам, - эти процессы продвинули распространение новых технологий

Каменный век (до 3000 до н.э.) Животные иногда используют естественные инструменты типа палок или камней, и существа, которые стали впоследствии людьми, несомненно делали то же самое в течение сотен тысячелетий перед первым гигантским шагом появления их собственных инструментов.

Неолитическая революция. Охватывает конец последнего ледникового периода, приблизительно 15 000 - 20 000 лет назад, когда некоторые из человеческих общин начали делать переход от длительного периода Палеокаменного, или Старого каменного века, где господствовала дикость, к более отлаженному образу жизни с использованием сельского хозяйства. Это время перехода к Неолитическому периоду, или Новому каменному веку, приведшему, в конечном счете, к повышению численности населения, к росту размера общин, и к началу городской жизни.

Городская революция (примерно 3000-500 до н.э.). Приблизительно 5000 лет назад начался важный культурный переход в нескольких подходящих географических ситуациях. Это выявило новые потребности и ресурсы и сопровождалось существенным продвижением в технологии. Так появились города.

Технические достижения Греции и Рима (500 до н.э. – 500 н.э.) Успехи Рима в философии и религии, политических и юридических учреждениях, поэзии и драме, вопиюще контрастировали с относительно ограниченным вкладом в технологию. Даже в оснащении вооруженных сил и строительстве, в котором они показали большую изобретательность и эстетическую чувствительность, их работа представляла больше завершение более ранних линий развития, чем кардинальное новшество. Этот очевидный парадокс классического периода древнего мира требует объяснения, и история технологии может обеспечить некоторые ключи к решению проблемы.

Средневековый прогресс (500-1500).

Тысячелетие между крахом Западной римской империи в 5-ом столетии нашей эры и началом колониального расширения Западной Европы в конце 15-ого столетия было известно традиционно как Средневековье, и первая половина этого периода состоит из пяти Темных веков. Мы теперь знаем, что этот период не был таким социально застойным, как это название предполагает. Во-первых, многие из учреждений более поздней империи пережили крах и глубоко повлияли на формирование новой цивилизации, которая развивалась в Западной Европе. Христианская церковь была выдающимся учреждением этого типа, но римские концепции закона и администрации продолжали оказывать влияние намного позже ухода римских легионов из западных областей. Во-вторых, и что более важно, тевтонские (прагерманские) племена, распространившиеся на большую часть Западной Европы, не пришли с пустыми руками: в некотором отношении их техника превосходила ту, которой обладали католики. Они были людьми Железного века, и хотя многое о происхождении тяжелого плуга остается неясным, эти племена стали первыми людьми с достаточно продвинутыми железными орудиями, чтобы предпринять систематическое заселение засаженной деревьями Среднешотландской низменности северной и Западной Европы,

тяжелые почвы которой разбили сельскохозяйственные методы их предшественников.

Захватчики прибыли, таким образом, как колонизаторы. Они, возможно, были расценены как «варвары» ориентированными на Рим жителями Западной Европы. В течение 500 лет новая цивилизация росла в силе и начала экспериментировать во всех аспектах человеческой активности и возвращать знания и достижения древнего мира. История средневековой технологии, таким образом, в значительной степени история сохранения, восстановления, и модификации более ранних достижений. Но к концу периода Западная цивилизация начала производить некоторые замечательные технологические новшества, которые в дальнейшем приобрели кардинальное значение.

Появление Западной технологии (1500-1750). Технологическая история Средневековья была одним из периодов медленного, но существенного развития. В последующий период темп изменений заметно увеличился и был связан с глубокими социальными, политическими, религиозными, и интеллектуальными переворотами в Западной Европе.

Появление этнических государств, раскол христианской Церкви протестантским преобразованием, Ренессансом и сопровождающей его научной революцией, экспансия европейцев на другие континенты обнаруживает взаимодействие с развивающейся технологией. Экспансия стала возможной после того, как прогресс в военно-морской технологии открыл океанские маршруты Западным навигаторам. Преобразование одиночных рейдов открытия новых земель в империализм и колониализм стало возможным с появлением новой огневой мощи. Маневренные суда с возросшей огневой мощью, железные орудия дали европейским завоевателям решающее преимущество, увеличенное другими технологическими достижениями.

Реформация, не являясь непосредственно главным фактором для истории технологии, однако оказала на нее влияние. Так, новые способы печатного дела способствовали распространению всех точек зрения, что внесло свой вклад в религиозные перевороты. Интеллектуальное ускорение, вызванное Реформацией, закончилось усилением профессионализма и таким образом стимулировало индустриальную и коммерческую деятельность и технологические новшества. Не случайно многие из изобретателей и ученых этого периода были кальвинистами, пуританами.

Промышленная революция (1750-1900). Термин неточен, потому что Промышленная революция не имеет ясно определенного начала или конца. Этот термин должен таким образом использоваться с некоторой осторожностью, коль скоро мы имеем продолжающееся ускорение процессов индустриализации, которая переходит в наше собственное время.

20-ое столетие

Развитие техники с 1900 до 1945. Недавнюю историю трудно описать, из-за массы материала и проблемы различения существенного и второстепенного. Относительно недавней истории технологии, однако, один факт выделяется ясно: несмотря на огромные достижения технологии к 1900, следующие десятилетия засвидетельствовали ещё больший прогресс, произошедший, к то-

му же и по более широкому спектру, чем вся предварительно зарегистрированная история. Самолет, ракета и межпланетные исследования, электроника, ядерная энергия, антибиотики, инсектициды, и масса новых материалов были все изобретены и развиты в это время, что создало беспрецедентную социальную ситуацию, полную возможностей и опасностей, которые было трудно вообразить вплоть до нынешнего столетия.

Мир в период 1900 - 1945 был во власти двух мировых войн, в связи с чем, начиная с 1945, появилась забота, как избежать новой мировой войны. Пограничный пункт - взрыв первой атомной бомбы в Аламогордо (Нью-Мексико) в июле 1945.

В ходе этих войн технологическое лидерство перешло от Великобритании и других европейских государств к Соединенным Штатам. Хотя многие важные изобретения были сделаны в Европе, именно Соединенные Штаты дали жизнь многим из них, доведя до коммерческого успеха. Как было с Великобританией в Промышленной революции, технологическая живучесть Соединенных Штатов в 20-ом столетии проявилась не столько специфическими новшествами, сколько их способностью принять новые идеи из любого источника. Большое влияние на техническое развитие, особенно в военной области оказало противостояние Соединенных штатов Америки и Советского Союза в период холодной войны, длившейся сорок лет.

Две мировые войны были сами по себе важными инструментами как технологических, так и политических изменений в 20-ом столетии. Быстрое совершенствование самолета - поразительная иллюстрация этого процесса, в то время как появление танка в первой войне и атомной бомбы во второй показывает те же самые признаки реакции общества посредством развития технологии на срочный военный стимул. Говорят, что Первая мировая война была войной химиков вследствие огромной роли взрывчатых веществ и ядовитого газа. Эти две войны стимулировали развитие технологии, ускорили преобразование «малой науки» в «большую науку», с акцентом на больших исследовательских командах, спонсируемых правительствами и корпорациями.

Хотя значение произошедших преобразований нельзя преувеличивать и потребность в независимом изобретателе, как показали недавние исследования, сохраняется, не остается сомнений, что изменение в масштабе технологических предприятий имело далеко идущие последствия. Это было одно из наиболее важных преобразований 20-ого столетия, поскольку изменило качество индустриальной и социальной организации. Этот процесс утвердил технологию, впервые в ее длинной истории, как важное звено, заслужившее уважение общества.

Техника в космическую эпоху

Многие послевоенные годы были проведены под сенью ядерного оружия, даже при том, что оно не использовалось в войне с этого времени. Атомное оружие подверглось важному развитию: бомбы расщепления 1945 г. были заменены более мощными бомбами синтеза в 1950 г; и к 1960 г. ракеты были готовы к доставке этого оружия в диапазоне тысяч километров. Эта новая военная технология имела не поддающееся расчету влияние на международные от-

ношения, поскольку внесла вклад в поляризацию мировых блоков военной мощи, определяя осторожность в ведении международных дел, которая отсутствовала ранее в 20-ом столетии.

Ядерная энергия ни в коем случае не была единственной технологической новинкой после 1945 г. Столь же впечатляющими были достижения в химической и медицинской технологии, транспорте и средствах связи, которые некоторые комментаторы поспешили назвать «второй промышленной революцией». Быстрое развитие электронной обработки информации создало новый мир компьютерной технологии, дистанционного управления, миниатюризации, и мгновенной связи. Еще более выразительным для этого периода был выход в околоземное пространство. Методы ракетной техники, сначала примененной в вооружении, были развиты для обеспечения транспортных средств, для запуска спутников и лунных и планетарных исследований и, в конечном счете, в 1969, для доставки первых людей на Луну и благополучного их возвращения. Это удивительное достижение стимулировалось частично международным идеологическим соревнованием: только Советский Союз и Соединенные Штаты имели и ресурсы и желание, чтобы выдержать огромные расходы, тем самым, оправдывая описание этого периода как «технологии космической эры».

Ядерная энергия. Первые атомные бомбы представляли только сравнительно грубую форму ядерного расщепления, освобождая энергию радиоактивного материала немедленно и взрываясь. Но было быстро оценено, что энергия, освобожденная в пределах критической атомной батареи, масса графита, поглощающего нейтроны, испускаемые радиоактивным материалом, могли дать высокую температуру, которая в свою очередь производила пар для вращения турбины, чтобы таким образом преобразовывать ядерную энергию в электричество годное к употреблению. На этом принципе в развитых индустриальных странах были построены ядерные электростанции, и система все еще проходит отработку, поскольку пока атомная энергия не вполне оправдала большие надежды, возлагаемые на нее как экономичный источник электричества и создает огромные проблемы обслуживания. Однако кажется вероятным, что усилия, посвященные экспериментам по более прямым способам управления ядерным расщеплением, в конечном счете, дадут свои результаты.

Альтернативы ископаемому топливу. Ядерный синтез может стать насущной необходимостью уже в начале нашего века, поскольку энергетические источники в виде ископаемого топлива и делящихся материалов могут закончиться в течение нескольких десятилетий. Самая привлекательная альтернатива - энергия, полученная из управляемой реакции синтеза, которая использовала бы водород из морской воды, фактически безграничного источника. Другие источники энергии, которые могут рассматриваться в качестве альтернативы ископаемого топлива, включают различного рода солнечные ячейки, получающие энергию от Солнца с помощью химической или физической реакции типа фотосинтеза. Солнечные ячейки этого вида регулярно используются на спутниках и других космических аппаратах, где поток энергии от Солнца может использоваться без помех со стороны атмосферы или вращения Земли.

Газовая турбина. Газовая турбина подверглась существенному развитию начиная с ее первой успешной эксплуатации в конце Второй мировой войны. Высокое отношение мощности к весу этого типа двигателя сделало его идеальным ускорителем для отрыва самолета от земли к 1960-ым гг. Первый самолет, превысивший скорость звука появился в 1947, и к концу 1960-х сверхзвуковой полет стал реальностью, хотя и не сразу начал использоваться на гражданских авиалиниях.

Материалы. Космическая эра породила новые материалы и раскрыла новые пути использования для старых материалов. Например, обширный диапазон применений был найден для пластмасс. Стекловолокно начало использоваться для кузовов автомобилей и корпусов малых судов. Углеродистое волокно послужило заменой металлам для высокотемпературных лопастей турбин. Исследование керамик позволило получить материалы, стойкие к высоким температурам для обшивки космических кораблей.

Автоматизация и компьютер. С конца Второй мировой войны началась разработка методов управления, автоматизации и компьютеризации. Жизненной частью оборудования стал компьютер, и особенно электронный цифровой компьютер, изобретение 20-го столетия, теория которого начала разрабатываться еще английским математиком и изобретателем Чарльзом Беббиджем в 1830-х гг. Цифровой компьютер Марк I заработал в Гарвардском университете в 1944 г. Ранние компьютеры, однако, были большими и дорогими машинами. Компьютерную технологию реконструировал транзистор. Транзистор - второе из ключевых изобретений космической эры. Он был изобретен Джоном Бардином, Уолтером Браттейном и Уильямом Шокли в 1947 г.

Потенциал для адаптации и использования компьютера кажется настолько большим, что много комментаторов уподобили компьютер человеческому мозгу, и нет сомнения, что человеческие аналогии были важны в его развитии. В Японии, где компьютер и другая электронная техника сделали гигантские успехи с 1950-ых, полностью компьютеризировали и автоматизировали фабрики к середине 1970-ых, некоторые из них применяли роботов в изготовлении других роботов. В Соединенных Штатах химическая промышленность демонстрирует поразительные примеры полностью автоматизированного, управляемого компьютером производства.

В медицине и науках о жизни компьютер стал мощным инструментом исследования и наблюдения. Теперь можно контролировать сложные действия и лечение. Исследование в биологии стали проводить при помощи современных методов и инструментов, которые начали открывать тайны формирования клетки и воспроизводства через самокопирующие свойства молекул ДНК во всех живых организмах и таким образом исследовать природу жизни непосредственно.

Исследование космоса. Ракета, которая играла критическую роль в революции военной техники с конца Второй мировой войны, приобрела более конструктивное значение в американских и советских космических программах. Первый захватывающий шаг осуществил Спутник 1. Шар, начиненный аппаратурой и весящий 83 килограмма, запущенный в космос Советским Союзом

4 октября 1957, стал первым искусственным спутником. Это достижение ускорило так называемую космическую гонку, в которой достижения сторон (СССР и США) следовали друг за другом в быстрой последовательности. Они могут быть удобно сгруппированы в четыре хронологически перекрывающихся стадии. Первая стадия, увеличение тяги ракет, способных к выведению спутников на орбиту для целей связи, наблюдения погоды, для контроля военной информации, и в топографических и геологических наблюдениях. Вторая стадия начиналась с успешного вывода на орбиту спутника Земли советского космонавта Юрия Гагарина 12 апреля 1961, в космическом корабле Восток 1. Этот полет продемонстрировал мастерство преодоления проблем невесомости и безопасного возвращения в атмосферу Земли.

Третья стадия была лунной программой. Снова, первое достижение было советское: спутник Луна-1, запущенный 2 января 1959, стал первым искусственным телом, которое вышло из гравитационного притяжения Земли, пролетело мимо Луны, и вышло на орбиту вокруг Солнца как искусственная планета. Первая мягкая посадка на Луне была сделана Луной-9 3 февраля 1966; это устройство несло камеры, которые передали первые фотографии поверхности Луны. К этому времени фотографии с близкого расстояния были сделаны аппаратами Рейнджер 7, 8, и 9. А в 1966 - 1967 серия из пяти американских лунных орбитальных аппаратов сфотографировали почти полную поверхность Луны с низкой орбиты в поиске подходящих мест для посадки. Американский Сурвейер 1 совершил мягкую посадку на Луне 2 июня 1966; это дало много дополнительной полезной информации о лунной поверхности. Тем временем нарастала мощность ракетных двигателей, и к концу 1960-ых в США появилась огромная 108-метровая ракета Сатурн V, весившая 2 725 тонн. Программа Аполлон достигла кульминации 20 июля 1969, когда Нейл Армстронг и Эдвин Олдрин выбрались из лунного модуля Аполлона 11 на поверхность Луны. Программа исследования Луны была прекращена в 1972.

Четвертая стадия исследования космоса была направлена на исследование планет Солнечной системы. Так, исследования Венеры производились как американскими, так и советскими ракетами в период 1962 по 1978 гг. Исследование Марса проводилось прежде всего американскими ракетами Маринер и Викинг. В начале 1980-ых США обследуют атмосферу и спутники Юпитера и Сатурна, в результате чего была обнаружена предварительно не известная конфигурация колец вокруг Юпитера, аналогичных таковым на Сатурне.

В начале и середине 1980-ых внимание американской космической программы было сосредоточено, прежде всего, на разработке транспортного средства многократного использования Шаттл (букв.: челнок) для обширного орбитального исследования.

Космическая программа США перенесла огромный удар в 1986, когда космический челнок взорвался спустя 73 секунды после старта, унеся жизни семи космонавтов. Были и другие разочарования, связанные в частности с выводом на орбиту космического телескопа Хаббл стоимостью 1,5 млрд. долларов. Межпланетные исследования, к восхищению и профессиональных и люби-

тельских астрономов, передали красивые, информативные изображения других планет.



Рис. 7.1. Переполировка орбитального телескопа Шаттл, декабрь 1993. Видны фигуры двух астронавтов, работающих в космосе, и на заднем фоне – западное побережье Австралии.

В начале космической эры можно только смутно почувствовать ее возможности.

Восприятие техники

Наука и техника. Результатом этого обзора истории техники является прояснение различия между наукой и техникой. История техники более длинна, чем история науки и отличается от нее. *Технология* - систематическое изучение способов делать вещи; *наука* - систематическая попытка понять и интерпретировать мир. В то время как технология обеспокоена изготовлением и использованием орудий, наука посвящена более концептуальному пониманию окружающей среды. Навыки счета развились только с появлением больших мировых цивилизаций.

Можно сказать, что наука начиналась приблизительно за 3 000 лет до н.э., тогда как технология, как мы видели, является столь же старой, как и само человечество. Вначале они развивались независимо. Конечно, были точки пересечения, типа использования математических знаний в строительстве зданий и ирригационной работе, но в основном функции ученого и технолога, используя эти современные термины ретроспективно, в древних культурах отличались

Ситуация начала изменяться в течение средневекового периода развития на Западе (500-1500 н.э.), когда и техническое новшество, и научное понимание взаимодействовали со стимулами коммерческого использования в городской культуре. В начале 17-ого столетия, философ естествознания Фрэнсис Бэкон

перечислил три больших технологических новшества - магнитный компас, книгопечатание и порох - как заметные достижения современного человека, квалифицировав экспериментальную науку в качестве средства увеличения господства человека над природой. Подчеркивая практическую роль науки, Бэкон призывал к гармонизации науки и техники, убеждая ученых изучать методы ремесленников, а последних – к изучению наук. Бэкон, наряду с Декартом и другими современниками, впервые увидел, что человек становится хозяином природы.

Союз науки и техники, предложенный Бэконом, был осуществлен не скоро. За последующие 200 лет, в строительстве даже крупных сооружений, например железных мостов, паровых двигателей и текстильных машин, обходились почти без ссылки на научные принципы. Но организации людей, вдохновленных принципами философии Бэкона, который сформировал Королевское общество в Лондоне в 1660, проявляли усилия, чтобы направить научное исследование к полезным результатам, сначала, улучшая навигацию и картографию, и, в конечном счете, стимулируя индустриальное новшество и поиск минеральных ресурсов. Подобные организации ученых развивались в других европейских странах, и ученые 19-ого столетия двигались к профессионализму техников. Таковы были Либих из Германии, один из отцов органической химии и первый сторонник применения минеральных удобрений, и Майкл Фарадей, блестящий британский ученый-экспериментатор в области электромагнетизма, подготовившие основание, на которое ступил изобретатель Томас А. Эдисон и многие другие.

После его достижений применение научных принципов к технологии быстро росло. Последнее привело к техническому рационализму Фредерика В. Тэйлора в организации рабочих при массовом производстве. Это обеспечило модель, которая была применена Генри Фордом на его автомобильном сборочном заводе и указало путь к развитию математического моделирования. Стало проявляться не только одностороннее влияние науки на технику, но и обратное влияние, поскольку технология создавала новые инструменты и механизмы, с которыми ученые были способны достигнуть постоянно увеличивающегося понимания естественного мира. Подобные события привели технологию к ее современному эффективному уровню работы на основе использования достижений науки.

Критика техники. К середине 19-ого столетия, нетехнологи были почти единодушно очарованы чудесами новой искусственной окружающей среды, растущей вокруг них. Большая промышленная выставка в Лондоне в 1851, с ее множеством машин, казалось, была кульминацией пророческого прогноза Фрэнсиса Бэкона о растущем господстве человека над природой. Маркс и Энгельс, придерживаясь радикально отличной политической ориентации, приветствовали технологический прогресс, потому что в их глазах это должно было привести к обязательной потребности в социалистической собственности и управлении промышленностью. Точно так же ранние образцы научной фантастики типа Жюль Верна и Уэллса с интересом исследовали возможности, от-

крываемые современной техникой и признавали обаяние техники в некоторых из своих произведений.

Другой писатель романист Олдос Хаксли изобразил общество ближайшего будущего, в котором техника была твердо возведена на престол, ***держа людей в физическом комфорте не только без знания, но также и без свободы, красоты, или творческого потенциала***, ограбленными на каждом витке личного существования. Эхо того же самого представления нашло острое артистическое выражение в фильме *Теперешние времена* (1936), в котором Чарли Чаплин изобразил эффект обезличивания на сборочной линии массового производства. Таким настроениям давали пищу международные политические и экономические условия 1930-ых, когда Западный мир был погружен в Большую депрессию.

Как это ни парадоксально, спасение от длившейся десятилетие экономической депрессии и успешной защиты Западной демократии во Второй Мировой Войне не принесло веры в технику. Ужасающие потенциальные возможности ядерной войны были показаны в 1945, и разделение мира на враждебные блоки предотвратило любую такую эйфорию. Роберт Оппенгеймер после испытания атомной бомбы в Лос-Аламосе выступил против решения создавать термоядерную бомбу. Тема технологической тирании по отношению к индивидуальности человека и его традиционному образу жизни была выражена Жаком Эллюлем из университета Бордо, в его книге *Технологическое общество* (1964). Эллюль утверждал, что техника настолько распространилась, что человек теперь жил в обстановке технического окружения, а не природы.

Технологическая дилемма. Это - дилемма между, с одной стороны, сверхзависимостью жизни в развитых странах от техники, и, с другой стороны, угрозой того, что техника понизит качество жизни в современном обществе и даже подвергнет опасности общество непосредственно.

Экологический баланс. Третья главная проблема современного технологического общества - это ***сохранение экологического равновесия***. Человек повреждал окружающую среду в течение многих столетий, уничтожая леса и занимаясь сельским хозяйством слишком интенсивно. И хотя были предприняты некоторые защитные меры, типа учреждения национальных парков, большой прирост населения и интенсивность индустриализации ускоряют всемирный экологический кризис. Этот кризис включает опасности, связанные с разрушением экваториальных лесов дождями, небрежной эксплуатацией полезных ископаемых, добываемых открытым способом, загрязнением океанов радиоактивными отходами и атмосферы продуктами сгорания. Оно включает избыток окислов серы и азота, производящих кислотный дождь, и углекислый газ, который может повлиять на всемирный климат через так называемый парниковый эффект. Существует опасность неразборчивого использования пестицидов.

Взаимодействие между обществом и техникой. Во-первых, нельзя не признать, что отношения между технологией и обществом являются сложными. Любой технологический стимул может вызвать разнообразие социальных ответов, в зависимости от таких непредсказуемых переменных, как различия между человеческими характерами; точно так же как трудно заранее выбрать какую

либо определенную социальную ситуацию, чтобы произвести желаемый технологический ответ. Любая «теория изобретения», поэтому, должна оставаться чрезвычайно предварительной, и любое понятие «философии» применительно к истории технологии должно учесть широкий диапазон возможных интерпретаций. **Главный урок истории технологии состоит в том, что она не имеет никакой точной прогнозирующей ценности.**

Во-вторых, определение технологии как систематического изучения методов делать вещи, определяет технологию как социальное явление.

Техника и образование. В ранних тысячелетиях человеческого существования, ремесло было приобретено в долгой и трудолюбивой манере, когда ученик обслуживал мастера, и тем самым постепенно обучался тайнам ремесла. Такой обычай в традиции часто больше связывался с религиозным ритуалом, чем с применением рациональных научных принципов. Обучение ремеслу укоренилось в Западной цивилизации в форме ученичества, которое выжило вплоть до 20-го столетия как структура для передачи технических навыков. Все более и более, однако, обучение новым методам требовало доступа и к общему теоретическому знанию. Это ускорило конвергенцию между наукой и техникой в 19-ом и 20-ом столетиях и создало сложную систему образовательных учреждений от простого обучения в школах к продвинутому исследованию в университетах. Французские и немецкие академии были в этом деле впереди, в то время как Великобритания в 19-ом веке несколько отставала. Но к 20-ому столетию все продвинутые индустриальные страны, включая вновь прибывших подобно Японии, признали ведущую роль теоретического технического образования в достижении коммерческой и индустриальной компетентности.

Получалось, что традиционно образованный западный человек отказывается признавать, что то или иное произведение искусства находится вне его понимания, но бодро признает, что он не понимает, как работают его радиоприемник или система нагрева. Английский писатель Артур Кёстлер характеризовал такого современного человека, изолированного от технологической окружающей среды и владеющего ее благами без понимания, как «городского варвара». Все же растущая распространенность технологии «черного ящика», в которой только утонченный эксперт способен понять чрезвычайно сложные процессы в электронном оборудовании, делает все более трудным избежать положения такого «варвара». **Равно как трудно переоценить важность тех дисциплин, которые обеспечивают мосты между этими двумя культурами, и здесь можно увидеть, сколь важна роль истории техники.**

Качество жизни. Четвертая тема в отношениях между техникой и обществом - качество жизни. Остается мало сомнений, что технология принесла более высокий уровень жизни людям в развитых странах, так же, как это позволило существовать быстро увеличивающемуся населению и в развивающихся странах. Это - перспектива улучшения жизненного уровня, которая делает повышение технической компетентности очень привлекательным для этих стран.

Однако желательный уровень материального благополучия и возможности досуга для развлекательных целей как критерий полноты жизни в любом человеческом обществе имеет другие, еще более важные, предпосылки, типа

обладания свободой в законопослушном сообществе и равенства перед законом. Свобода и равенство - традиционные качества демократических обществ, и возникает вопрос, способствует ли технология их приобретению. Конечно, очень отсталые режимы использовали технологические устройства для подавления индивидуальной свободы и обеспечения повиновения государству: видение кошмара Джорджа Оруэлла «Тысяча девятьсот восемьдесят четвертый» (написано в 1949), с его экранами телевизора и искусными пытками, обеспечило литературную демонстрацию этой действительности. Но тот факт, что высокая техническая компетентность требует высокого уровня образования, вселяет надежду, что общество, которое является образованным, не будет долго выносить ограничения на индивидуальную свободу и инициативу, не имеющие внутреннего оправдания.

Даже в то время как угроза технического самоуничтожения остается и проблемы управления народонаселением и экологической неустойчивостью требуют решения, человек нашел ключ от его собственного будущего в виде поиска путей в глубины бесконечно привлекательной Вселенной. Пока еще только несколько провидцев оценили богатство этой возможности, и их проекты слишком легко признаны не чем иным как научной фантастикой. В этом контексте стоит вспомнить слова Артура Кларка, одного из наиболее проницательных современных провидцев, в его *Профилях будущего* (1962): он предполагал, что всезнающие существа, которые могут развиваться из наших скромных начал, «могут завидовать нам, греясь в ярком послесвечении Создания; поскольку мы знали Вселенную, когда она была молодой».

13.2. Осмысление феномена техники

Философия техники возникла в XIX столетии. Первым ввел в оборот это словосочетание немецкий философ Эрнст Капп в своей книге, изданной в 1877 г., «Основные направления философии техники. К истории возникновения культуры с новой точки зрения». В конце того же века русский инженер П.К. Энгельмейер формулирует задачи философии техники в своей брошюре «Технический итог XIX века» (1898 г.). Его работы были опубликованы и на немецком языке. Однако только в XX в. техника, ее развитие и значение для будущего общества становятся предметом систематического изучения.

Правда техника в целом не является предметом изучения технических дисциплин. Конечно, многие естественные науки вынуждены принимать во внимание технику, но делают это со своей, естественнонаучной точки зрения. Зато ряд общественных наук и, прежде всего, социология и психология, обращаются к анализу технического развития.

Техника относится к сфере материальной культуры. Тем не менее, как хорошо известно, материальная культура связана с духовной самыми неразрывными узами.

Итак, **техника** предполагает:
 совокупность технических устройств и систем;
 деятельность по созданию этих устройств;

технические знания и их производство.

О техническом образовании. Техника возникла вместе с возникновением человека и долго развивалась в отрыве от какой бы то ни было науки. Да и сама наука долгое время не имела особого статуса. Даже у Аристотеля нет специальных трудов по технике, поскольку она была отделена от теоретического знания. Взаимоотношения науки и техники развивались неровно. Вначале наука многое взяла от умелых людей (у мастеров-инженеров эпохи Возрождения), а затем техника стала организовываться по образцу науки. Началась саянтификация техники и технизация науки. Таким образом, в ходе исторического развития техническое действие и техническое знание стали отделяться от мифа и магического действия.

Возникла необходимость массового обучения ремеслу (а не от отца к сыну, как раньше). Фундаментальный труд немецкого инженера Георгия Агриколы «О горном деле и металлургии в 12 книгах» (1556) был по сути дела первой производственно-технической энциклопедией и выполнял роль первого учебника. В России одним из первых учебных заведений для подготовки инженеров было Горное училище, учрежденное в 1773 г. в Петербурге. Влияние преобразований Петра I и здесь сказалось. Научная ориентация только начинала пробивать себе дорогу.

Первыми полунаучными учебниками были учебники по механике. Потребовалось почти столетие, чтобы полутеоретическое описание всех существующих машин с точки зрения начертательной геометрии, заложенное Гаспаром Монжем (основавшим в 1794 г. Политехническую школу в Париже и являющимся автором начертательной геометрии) в программу обучения инженеров в Парижской политехнической школе, превратилось в подлинную теорию механизмов и машин.

Вторая ступень рационального обобщения техники заключалась в обзоре и обобщении всех существовавших областей ремесленной техники. «Общая технология» Иоганна Бекмана и французская «Энциклопедия» - образцы таких учебников-обзоров.

Технические науки, которые формировались прежде всего как приложения областей естествознания к различным классам инженерных задач, в середине XX в. образовали особый класс научных дисциплин, не только отличающихся от естественных наук по объекту и по внутренней структуре, но также обладающих дисциплинарной организацией.

Наконец, высшую на сегодня ступень рационального обобщения в технике представляет собой системотехника как попытка комплексного теоретического обобщения всех отраслей современной техники и технических наук при ориентации не только на естественные науки, но и на гуманитарные, базирующаяся на системной картине мира.

Вот перечень дисциплин изучаемых будущим системотехником в США:

Общая теория систем, линейная алгебра и матрицы, топология, теория комплексного переменного, интегральные преобразования, векторное исчисление, дифференциальные уравнения, математическая логика, теория графов, теория цепей, теория надежности, математическая статистика, теория вероятно-

стей, линейное, нелинейное и динамическое программирование, теория регулирования, теория информации, кибернетика, методы моделирования и оптимизации, методология проектирования систем, применение инженерных моделей, проектирование, анализ и синтез цепей, вычислительная техника, биологические и социально-экономические, экологические и информационно-вычислительные системы, прогнозирование, исследование операций и т.д.

Из перечня видно, насколько широка подготовка современного инженера-системотехника. Однако главное для него - научиться применять полученные знания для решения двух основных системотехнических задач: обеспечение интеграции частей сложной системы в единое целое и управления процессом создания такой системы.

13.2. Автоматизация

Первоначально это интеграция станков в полностью автоматическую, а в некоторых случаях саморегулирующуюся систему. Передовые страны приступили к автоматизации промышленности в начале 1950-х годов. Зародившись как концепция производства, сегодня автоматизация означает много больше, чем координация функционирования ряда станков. В настоящее время она осуществляется на всех уровнях предпринимательства и производства. Вряд ли найдется вид деятельности – социальной или экономической, не подверженный в той или иной степени внедрению автоматически управляемых устройств или систем. Перечень направлений автоматизации включает, например, запуск и автоматическое пилотирование летательных аппаратов, производство автомобилей, управление движением транспорта и его маршрутизацию, медицинскую диагностику, игру в шахматы и автоматическое обновление банковского баланса в соответствии с указаниями, поступающими от компьютера, который может находиться на расстоянии во много километров.

С технической точки зрения, автоматизация может рассматриваться как последний этап промышленной революции. Первый этап этой революции можно было бы охарактеризовать словом «механизация»; ключевым фактором на этом этапе было использование механизмов и машин вместо мускулов. На протяжении одного столетия доля физического труда человека и животных в промышленности и сельском хозяйстве снизилась с 90 до примерно 10%. Маловероятно, что автоматизация изменит это соотношение, потому что большинство людей больше не служат в качестве вьючных животных или простых источников энергии. Все чаще люди управляют механической силой и энергией и действуют как связующее звено между механизированными операциями, в которых автоматизация осуществила и еще будет осуществлять разительные перемены.

Обратная связь. Важнейшей характеристикой автоматизации является способность машин к саморегулированию, что стало возможным благодаря технике обратной связи. Обратная связь, соединенная с быстрой и автоматической обработкой информации, – вот в чем секрет широкого распространения и успехов автоматизации.

Применение принципа обратной связи до наступления 20 в. носило случайный характер. Положение сильно изменилось во время Второй мировой войны. Системы управления настолько улучшили маневренность и повысили скорость самолетов, что обычные способы борьбы с ними оказались устаревшими. Научные и инженерные силы передовых стран сосредоточились на разработке автоматизированных систем.

Обратную связь в больших масштабах первой начала использовать перерабатывающая промышленность и энергетика. К середине 1950-х годов в США были почти полностью автоматизированы некоторые нефтеперерабатывающие заводы и несколько атомных электростанций. Такое лидерство объясняется природой этих отраслей промышленности; нефтепродукты и газы, например, могут легко транспортироваться по трубам, а атомные электростанции требуют дистанционного управления реактором.

Промышленность настойчиво изыскивает подходы, которые позволили бы производить высококачественные продукты при низкой стоимости. Значительные успехи были достигнуты 1) в разработке аналитических приборов, позволяющих контролировать технологический режим и анализировать химический состав газов и жидкостей в сотнях точек внутри технологической установки, 2) в разработке и конструировании разнообразного автоматически управляемого оборудования, 3) в использовании больших компьютеров для управления технологическими процессами, 4) в оптимизации производительности промышленного оборудования.

Наиболее яркие достижения в управлении процессами были результатом использования цифровых компьютеров. Цифровые компьютеры могут быть запрограммированы так, что будут справляться и с непредвиденными ситуациями, которые могут возникнуть в технологическом процессе. При этом автоматически управляемое оборудование может функционировать с исключительно малыми допусками и немедленно реагировать на отклонения от правильного течения процесса. Современные телеметрические средства позволяют интегрировать эти компьютеры в единую информационную систему управления ресурсами

Дискретное производство. Этот тип производства включает, как правило, три широкие категории: 1) поточное (массовое) производство – процесс, который подходит для изготовления в больших количествах одной и той же детали или продукта, как, например, при производстве пуговиц или автомобилей, 2) мелкосерийное производство – изготовление деталей или продуктов партиями от нескольких сотен до нескольких тысяч ежегодно (скажем, микроскоп или охотничье ружье) и 3) заказное или штучное производство – изготовление деталей или продуктов от одного или двух до нескольких сотен (например, реактор или крупная гидравлическая турбина). Поточное производство характеризуется предопределенной последовательностью операций, тщательно разработанных с целью обеспечить минимальную себестоимость при приемлемом качестве; эти операции требуют более специализированного оборудования и легче автоматизируются. Мелкосерийное и штучное производства имеют прерывистый характер, не придерживаются жестко какой-либо неизменной последо-

вательности операций, используют универсальное оборудование, занимают значительно более длительное время, имеют более высокую себестоимость и меньше поддаются автоматизации.

Усилия по автоматизации некоторых операций поточного и мелкосерийного производств начались с разработки станков с числовым программным управлением. Числовое управление с помощью предварительно запрограммированных перфолент заменило настраиваемые вручную кулачки и храповики, которые до той поры управляли работой станков. С появлением миникомпьютеров стало возможным прямое цифровое управление (ПЦУ). ПЦУ представляет собой централизованное управление с помощью компьютера группой станков и обеспечивает работу небольших автоматизированных систем механической обработки. Когда в середине 1970-х годов стали доступны микропроцессоры, появилось компьютерное числовое управление, что позволило создать станки, которые управлялись отдельным микропроцессором, допускавшим перепрограммирование, и оказались экономически эффективными. В 1960-х годах стали доступны роботы – перепрограммируемые многофункциональные манипуляторы. Роботы позволяют обеспечить полную автоматизацию, особенно в таких видах деятельности, которые являются опасными или требуют точности и высокой степени повторяемости операций. Эти технологии привели к значительным успехам в области обработки материалов, что, в свою очередь, послужило важным фактором в развитии автоматизации складского хозяйства.

Успехи в информационной технологии, особенно в интерактивной графике, связи, системах управления базами данных и в прикладном программном обеспечении, позволили развить два важных направления – проектирование с помощью компьютеров (САПР) и производство с помощью компьютеров (АСУП). Соответствующие системы открывают перспективу значительного повышения эффективности инженерно-технического и промышленного труда.

ВЛИЯНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ЭКОНОМИКУ И ОБЩЕСТВО.

Будущее автоматизации. Хотя трудно прогнозировать возможное влияние автоматизации на промышленность и сферу обслуживания, одно кажется несомненным: тенденция создания и распространения автоматизированных систем сохранится. Вместо того чтобы разрабатывать узлы и компоненты, а затем их согласовывать и строить автоматическую систему, предпочтение будет отдано разработке самой системы. Конкретные области технологии, а также различных технических дисциплин, которые развиваются по отдельности, будут сближаться.

Первая промышленная революция создала новую среду для человечества. Приведя крестьян с полей и ремесленников из малых мастерских на фабрики, она обеспечила концентрацию и централизацию человеческих усилий и тем самым – массовое производство. Никто, и менее других Р. Аркрайт и Дж. Уатт, не думали, что они совершили цивилизационный переворот, но именно это и произошло в действительности. Влияние новых машин на повседневную жизнь имело гораздо более революционный характер, чем сами машины. Революция,

связанная с автоматизацией, также обещает привести к более глубоким социальным последствиям, чем те или иные технологические усовершенствования.

Социальные изменения. Двести лет назад, когда большинство людей работали от 60 до 70 ч в неделю, чтобы свести концы с концами, вопрос о том, что делать со свободным временем, не возникал. Сегодня, когда для промышленности стала приемлемой 40-часовая рабочая неделя, многие рабочие имеют в несколько раз больше свободного времени, чем их деды. По мере распространения автоматизации индивидуальная производительность также будет возрастать, и количество человеко-часов, затрачиваемых на конкретную работу, будет уменьшаться. Таким образом, со временем мы можем получить 30-часовую рабочую неделю.

Новая революция приведет к трансформации многих черт общества. Запрет детского труда и законы, регулирующие заработную плату, продолжительность и условия труда, эволюционировали так, чтобы защитить человека от экстремальных воздействий производственной среды. Автоматизация уже начала освобождать людей от производственной зависимости. Когда рабочая сила переместится с заводов в учреждения (а функции самих учреждений перейдут к работе на дому), обычные профессиональные союзы тоже изменятся или появятся новые профсоюзы, удовлетворяющие специфическим требованиям *«постиндустриальных»* трудящихся.

Искусство и культура традиционно зависели от патронажа привилегированных социальных слоев. С появлением все большего свободного времени и денежных средств у широких слоев населения культура и искусство займут в жизни людей более заметное место. Окажется затронутым даже образование. Информационные системы, программирование и машинные языки уже подвели нас к прорыву в теории и практике обучения; что означал бы такой прорыв во всех сферах образования, культуры и общественной деятельности, — об этом можно только гадать.

Изменения в экономике. Здесь отметим лишь, что экономическое неравенство между странами, начало которому положила первая промышленная революция, по-видимому, будет возрастать, быть может, ускоренными темпами и с другими государствами-лидерами.

14. Искусственный интеллект – информационная основа техники⁴³

14.1. Некоторые определения

Дадим сначала некоторые определения.

РАССУДОК И РАЗУМ, соотносительные понятия философии; у И. Канта рассудок — способность образования понятий, суждений, правил; ра-

⁴³ ЛИТЕРАТУРА: Вейценбаум Дж. Возможности вычислительных машин и человеческий разум. М., 1982. Ефимов Е.И. Решатели интеллектуальных задач. М., 1982. Интеллектуальные процессы и их моделирование. М., 1987. Кондратов А.И. Электронный разум. М., 1987.

зум — способность образования метафизических идей. Диалектика рассудка и разума развита Гегелем: рассудок как низшая способность к абстрактно-аналитическому расчленению является предварительным условием высшего, «разумного», конкретно-диалектического понимания. Рассудок нередко понимают как способность оперировать готовым знанием, разум — как творчество нового знания.

ИНТЕЛЛЕКТ [лат. intellectus разумение, понимание]. Мыслительная способность, умственное начало у человека. **Искусственный интеллект** — раздел *информатики*, занимающийся разработкой методов моделирования и воспроизведения с помощью ЭВМ творческой деятельности человека.

Теперь рассмотрим тему главы.

14.2. Искусственный интеллект

Это раздел информатики, изучающий принципы действия интеллектуальных машин. Исследователи, работающие в этом направлении, надеются достичь такого понимания механизмов интеллекта, при котором можно будет составлять компьютерные программы *с человеческим или более высоким уровнем интеллекта*. Общий подход состоит в разработке методов решения задач, для которых отсутствуют формальные алгоритмы: понимание естественного языка, обучение, доказательство теорем, распознавание сложных образов и т.д. Теоретические исследования направлены на изучение интеллектуальных процессов и создание соответствующих математических моделей. Экспериментальные работы ведутся путем составления компьютерных программ и создания машин, решающих частные интеллектуальные задачи или разумно ведущих себя в заданной ситуации. Систематические исследования в области искусственного интеллекта начались лишь с появлением цифрового компьютера. Первая научная статья по искусственному интеллекту была опубликована в 1950 А. Тьюрингом. Ниже будут указаны основные направления исследований в области искусственного интеллекта и соответствующие методы.

Поиск. Когда компьютер с игровой программой должен сделать ход, у него обычно имеется выбор из нескольких возможных ходов. Каждый его ход может иметь ряд различных следствий, зависящих от ответных ходов партнера, а каждое следствие может приводить к другим возможным ходам и т.д.

Главная проблема поиска в условиях таких «деревьев возможностей» — т.н. комбинаторный взрыв. Если на каждом уровне поиска имеется 10 возможных вариантов, то 10 уровней поиска дают 10 миллиардов возможных вариантов, полностью проверить которые за приемлемое время не способны даже быстроедействующие компьютеры. Поэтому программисту приходится прибегать к «эвристикам» (процедурам, не основанным на формально доказанном алгоритме), которые позволили бы отвергнуть преобладающую часть альтернатив, иной раз даже с риском упустить наилучший ответ. Таким образом, если нет времени перебрать все варианты игры до конца, программа должна решить, когда ей нужно прекратить поиск, и проанализировать позицию приближенно.

О прогрессе в данной области можно судить по успехам компьютерных программ для игры в шахматы. Например, одна из первых шахматных программ анализировала 7 наиболее вероятных ходов, 7 вероятных ответных ходов на эти ходы, 7 следующих ответных ходов и 7 ответов на каждый из них, а всего 2401 окончательную позицию. В анализе основного массива этих позиций на самом деле не было необходимости. Если найден один ответный ход, нейтрализующий данный первый ход, то незачем искать другие эффективные ответные ходы. Этот вывод был обобщен в так называемую *альфа-бета-эвристику* для сокращения поиска, которая применяется во всех современных программах различных игр.

Цели и подцели. Для достижения некоей цели часто требуется найти последовательность действий, основанную на информации о том, каковы необходимые предварительные условия и последствия успешного выполнения тех или иных действий. На основе анализа того влияния, которое одно действие оказывает на условия успешного выполнения других действий, была создана компьютерная программа для автоматизированного проектирования электронных схем.

Представление знания. Многие трудности при создании машин, выполняющих определенные интеллектуальные задачи, связаны с вопросами о том, какую информацию должна иметь программа, каким образом на основании этой исходной информации могут быть сделаны дальнейшие выводы и как эта информация должна храниться в компьютере. Необходимость решения этих проблем были вызваны к жизни исследования, цель которых – ответить на вопрос, что такое знание. Многие аналогичные проблемы исследует эпистемология.

15. Квантовая психология и квантовый компьютер

Во второй половине XIX века Максвелл в поисках оружия против «тепловой смерти» изобрел «демона» - мифическое существо, способное наблюдать отдельные молекулы и управлять ими. Разделив сосуд с газом на две части и собирая более быстрые молекулы в одной из них, демон смог бы, не производя работы, изменить температуру в отдельных частях сосуда. Таким образом разумная машина сможет предотвратить тепловую смерть. Этот вывод полностью противоречил второму началу термодинамики и повергал физиков в смятение. Поэт Андрей Белый вспоминал о лекциях по физике, которые он слушал на рубеже веков, будучи студентом Московского университета⁴⁴:

... И строгой физикой мой ум
 Переполнял профессор Умов.
 Над мглой космической он пел,
 Развив власы и выгнув выю,
 Что парадоксами Максвелл

⁴⁴ Андрей Белый. *Первое свидание. Стихотворения и поэмы.* Москва, 1966.

Позднее Смолуховский показал, что демон Максвелла, пытаясь измерить скорость молекулы, будет увеличивать энтропию и не сможет создать вечного двигателя второго рода. Однако он не отрицал возможности создания таких устройств с помощью «более интеллигентных» существ (или устройств? – А.Р.). К 1949 году рассуждения такого рода на уровне математического фольклора фон Нейман применил к компьютерам. Он предположил, что платой за работу компьютера будет рассеяние энергии порядка $kT \ln 2$ за один шаг вычислений. Однако все эти блестящие исследования были слишком абстрактны, чтобы изгнать демона Максвелла из физики. Таким образом, демон Максвелла сохранял свое демоническое начало на протяжении столетия, пока не был развенчан.

Новая веха истории квантовых компьютеров отмечена работами Фейнмана⁴⁵. Ещё в начале научной деятельности он изобрел свой знаменитый функциональный интеграл, который сводил вычисление функции Грина уравнения Шредингера для квантовой частицы к суммированию всех возможных её классических траекторий. Это означает, что число возможных состояний квантовой системы экспоненциально велико по сравнению с таким же числом соответствующей классической системы. Таким образом, бессмысленно надеяться на помощь классических компьютеров в серьезных исследованиях квантовых систем, но можно попытаться использовать для этих целей квантовые компьютеры. Так прирученные слоны помогают в охоте на своих диких собратьев (на уровне «подсадных уток»? – А.Р.).

Ещё до Фейнмана необходимость развития квантовых вычислений именно в силу большой информационной ёмкости отстаивал Ю.И. Манин⁴⁶. Главная задача в теории квантовых автоматов виделась ему в необходимости абстрактной формулировки работы автомата, использующей лишь общие принципы квантовой теории, и прежде всего, описание эволюции системы в терминах общего унитарного преобразования в гильбертовом пространстве. Задача, о которой говорил Манин вскоре была решена Дойчем⁴⁷, что положило начало современной математической теории квантовых компьютеров.

15.1. Квантовая механика и сознание

15.1.1. Квантовые парадоксы с позиции психолога⁴⁸

Эйнштейн как-то сказал, что если, согласно квантовой теории, наблюдатель создает или частично создает наблюдаемое, то мышшь может переделать

⁴⁵ R. Feynman. Int. J. Theor. Phys., V. 21, №№ 6/7. 1982. Перевод: Р. Фейнман. Моделирование физики на компьютерах. Квантовомеханические компьютеры // Квантовый компьютер и квантовые вычисления. – Ижевск, 1999, С. 96-124 и 125-156.

⁴⁶ Ю.И. Манин. Вычислимое и невычислимое. Москва, «Советское радио», 1980.

⁴⁷ Д. Дойч. Структура реальности. – М – Ижевск: Изд-во РХД, 2001.

⁴⁸ Роберт Антон Уилсон. Квантовая психология. - К.: «Янус», 1998. – 224 с. По мнению её автора, книга создана как учебное пособие для тех, кто хочет разобраться, в какой реальности он живет и как можно с ней обращаться. Книга в английском оригинале издана в 1990 г.

вселенную, просто посмотрев на нее. Квантовая психология – наука 21 века объясняет, как наблюдатель создает наблюдаемое⁴⁹.

Шредингер, как было описано выше, рассуждал о коте, который и жив и мертв одновременно.

Вигнер дополнил аргументы Шредингера, показав, что кот, мертвый (или живой) для одного наблюдателя, оказывается и мертвым, и живым для другого.

Как утверждается в книге доктора Ника Херберта «*Квантовая реальность*», большинство физиков принимает копенгагенскую интерпретацию квантовой механики, предложенную Нильсом Бором. Согласно Хеберту, она сводится к тому, что «не существует никакой глубокой реальности». Доктор Дэвид Бом, однако, говорит следующее: «Копенгагенское понимание отрицает, что мы можем делать какие-либо утверждения относительно действительности». Оба они отвергают копенгагенское понимание и уверены, что **физика может делать утверждения о природе действительности**. Я с этим согласен, утверждает Р. Уилсон (а как это можно совместить с провозглашаемым далее автором отсутствием сущности у объектов? – А.Р.). Но «глубокая реальность» находится в совершенно другой сфере – сфере философских рассуждений доэкзистенциалистских философов (последователей Платона или Аристотеля).

Этот **отказ говорить о глубокой реальности чем-то напоминает принцип неопределенности Гейзенберга и эйнштейновский принцип относительности**, который утверждает, что невозможно узнать истинную длину прута, но лишь различные длины, измеренные в различных инерциальных системах.

Итак, первый пункт сходства между квантовой механикой и мозговым программным обеспечением – первый шаг к созданию того, что называется здесь квантовой психологией, – что изучение и «материи» и «сознания» заставляет нас подвергнуть сомнению привычные представления о реальности.

У меня нет никакой ученой степени по физике, говорит Уилсон. И если я достаточно хорошо понимаю квантовую логику, то это лишь потому, что трансакционная психология⁵⁰, наука о том, как мозг обрабатывает данные, имеет дело с той же роковой непредсказуемостью, которая вызывает столько нареканий в квантовой механике. Собственно, я мог бы даже сказать, что изучение науки о мозге лучше подготовит вас к восприятию квантовой теории, чем изучение классической физики.

⁴⁹ Квантовая психология – поиск и использование аналогий между квантовой механикой и психологическим подходом к действительности – А.Р.

⁵⁰ Трансакционный анализ — это интеракционная психотерапия, построенная на предположении о том, что люди принимают текущие решения, основываясь на прошлых предпосылках, к-рые в свое время могли способствовать выживанию, но на данный момент часто не имеют силы. Хотя ТА может быть использован в индивидуальной терапии, он особенно пригоден для групп. Этот подход ориентирован на когнитивный, рациональный и поведенческий аспекты личности. Главной целью терапевтического процесса является помощь индивидууму в принятии новых решений относительно текущего поведения и направления жизни. Автор ТА Э. Берн, строит свою теорию личности на «каркасе» из трех отдельных эго-состояний: Родитель, Взрослый и Ребенок.

Параллели между физикой и психологией не должны удивлять вас.

Ведь человеческая нервная система – «ум», если говорить по-ненаучному, собственно, и создала современную науку, включая физику и современную математику. И в психологии, и в физике мы уже переросли средневековые аристотелевские понятия об «объективной реальности» и вошли в неаристотелевский мир, - хотя в обеих науках мы пока еще точно не знаем, какая новая парадигма придет на смену аристотелевской парадигме «истинное-ложное».

Планк и Эйнштейн фактически открыли, что ***человеческая нервная система, усиленная разработанными человеком инструментами, производит результаты не более (логически – А.Р.) «непогрешимые», чем просто человеческая нервная система без всяких инструментов***⁵¹. (Инструменты зато дают больше фактов в единицу времени и потому делают умозаключение более обоснованным, но логичности не добавляют. – А,Р.)

«Чистое умозаключение» базируется на аксиомах, которые нельзя ни доказать, ни опровергнуть. Эти аксиомы появляются в сознании, приходя с уровня до-логического понимания.

Напомню, что мы говорим о тех аргументах, на которых создавалась наука. ***Одно время казалось, что она готова и способна разрешить все наши проблемы. Со всеми своими замечательными уравнениями и чудесными инструментами она вроде бы предлагала более надежный способ решения экзистенциальных***⁵² ***проблем, чем греческая логика.*** Предприниматели заметили это очень быстро и начали финансировать «научные исследования». Философы-рационалисты заметили это чуть позже и радостно высказали предположение, что со временем наука сможет выйти за пределы «практичности» и произвести на свет Чистую Истину.

Но затем Эйнштейн показал, что двое часов могут измерять время по-разному Абсолютная Истина снова ускользнула от нас!

Квантовая механика показала, что различные инструменты могут давать радикально отличающиеся «толкования» пространственно-временных событий в субатомном мире (корпускулярно-волновой дуализм – А.Р.). Поначалу это казалось физикам непостижимым, поскольку через три столетия после того как Галилей не оставил камня на камне от аристотелевской физики, они все еще мыслили категориями логики Аристотеля, в которой предмет должен быть либо

⁵¹ С появлением компьютеров это утверждение Уилсона уже не выглядит столь безупречным – А.Р.

⁵² ЭКЗИСТЕНЦИАЛИЗМ (от позднелат. *existentia* — существование), или философия существования, направление современной философии, возникшее в нач. 20 в. в России, после 1-й мировой войны в Германии, в период 2-й мировой войны во Франции, а после войны в других странах. Идеиные истоки — учение Кьеркегора, философия жизни, феноменология. Различают религиозный экзистенциализм (К. Ясперс, Г. Марсель, Н. А. Бердяев, Л. Шестов, М. Бубер) и атеистический (М. Хайдеггер, Ж. П. Сартр, А. Камю). Центральное понятие — экзистенция (человеческое существование); основные модусы (проявления) человеческого существования — забота, страх, решимость, совесть; человек прозревает экзистенцию как корень своего существа в пограничных ситуациях (борьба, страдание, смерть). Постигая себя как экзистенцию, человек обретает свободу, которая есть выбор самого себя, своей сущности, накладывающий на него ответственность за все происходящее в мире. Оказал значительное влияние на литературу и искусство Запада.

волной, либо частицей и не может быть и волной, и частицей (точнее: то волной, то частицей), в зависимости от того, как мы смотрим на него.

Начнем подводить итоги: мы думали, что можем убежать от относительности и неопределенности наших органов чувств, построив «умные» инструменты, но теперь мы обнаружили относительность и самих инструментов. «...Что бы мы ни описывали, человеческий ум не может отделиться от этого» (доктор Джонс)⁵³.

Если мы не можем описать что бы то ни было «как оно есть», но только «как оно представляется нашему уму» (см. замечание выше – А.Р.), следовательно, у нас не может быть и чистой физики, а только нейрофизика – то есть физика, преломляемая через человеческую нервную систему.

Западная цивилизация достигла преждевременной определенности благодаря Платону и Аристотелю, затем достигла нового вида преждевременной определенности благодаря Аквинату и средневековым богословам, достигла третьей преждевременной определенности благодаря Ньютону и эпохе Разума и т.д. Западная цивилизация, судя по всему, не подозревала о том, что революции следующих двух десятилетий изменят ее и ее последний туннель реальности до такой степени, какую мы не можем предсказать в 1990 году.

Квантовая логика

Аристотель оставил нам всего два варианта для выбора: «истинно» и «ложно». Фон Нейман добавил к ним «может быть». Квантовая логика (КЛ) очень хорошо применима к повседневной жизни. Например, я подбрасываю монету. Она определенно подчиняется Аристотелевой логике и упадет либо орлом, либо решкой вверх. Но в каком состоянии существует монета, пока она кувыркается в воздухе? Она находится в фоннеймановском состоянии «может быть» до тех пор, пока не упадет на пол.

Что равняется вселенной?

Как считают благочестивые католики, вселенной равняется философия Фомы Аквинского. А вот с точки зрения благочестивых русских коммунистов, вселенной равняется идеология диалектического материализма. Впрочем, если не считать католиков, марксистов, объективистов и приверженцев кое-каких других воинствующих организаций вроде Комитета по научному расследованию сообщений о паранормальных явлениях (КНРСПЯ)⁵⁴ или твердокаменных

⁵³ Думается, что здесь не совсем точен перевод: не ум не может отделиться от описываемого, а описываемое не может отделиться от описывающего ума – А.Р.

⁵⁴ Англ. Committee for the Scientific Investigations of Claims of the Paranormal (CSICOP). Базирующаяся в Буффало (штат Нью Йорк) организация, объединяющая ученых, скептически настроенных по отношению к паранормальным явлениям. Дочерняя организация Американской гуманистической ассоциации. Первая кампания КНРСПЯ была направлена против астрологии. Журнал Комитета первоначально назывался «Зететик»; после трех выпусков был переименован в «Скептикал инкуайрер» Критики Комитета отмечают явно излишний пыл «расследователей» при опровержении паранормального и характеризуют КНРСПЯ как ненаучную организацию, а скорее фундаменталистскую религиозную группу.

баптистов, большинство из нас в нынешний технологический век, по крайней мере, смутно догадывается о том, что никакая комбинация слов - даже самая красивая – не может в точности равняться вселенной. Мы начинаем осознавать, что ничто не равняется вселенной, кроме самой вселенной.

Кот Шредингера и мышшь Эйнштейна

Каждый раз, когда внешний или внутренний спусковой механизм вызывает в нас квантовый скачок из одного «я» в другое, меняется и окружающий нас внешний мир. Здесь автор развивает идею об отсутствии сущности у объектов⁵⁵.

По поводу кота Шредингера фон Нейман сказал бы, что до того как мы откроем коробку, вектор состояния имеет три значения: *мертвый кот*, *живой кот* и *может быть*. Эверетт, Уилер и Грэхем предлагают иную модель (ЭУГ). В этой модели вектор состояния никогда не коллапсирует. Каждый возможный исход проявляется в различных собственных состояниях (eigenstates, вероятностных множествах). Таким образом, в *суперпространстве* – это понятие было предложено Уиллером для решения совсем других задач (математической формулировки гравитации в эйнштейновской вселенной) – наш мир не одинок. Число таких параллельных миров Хью Эверетта, по оценке де Витта, более 10^{100} . Копенгагенские воззрения всегда будут казаться утверждением, что мы буквально создаем физическую вселенную, наблюдая её. А ведь это, в сущности, та позиция, которую отстаивал епископ Беркли, и её легко свести к карикатурному солипсизму⁵⁶. Отсюда и знаменитое саркастическое замечание Эйнштейна о мышши, каждый новый взгляд которой на мир может его изменять.

Сравнение моделей микромира

Модель ЭУГ принимает основные уравнения квантовой механики в чистом виде, в то время как Копенгагенская модель и модель скрытой переменной увенчивают эти уравнения философской интерпретацией. В этом смысле модель ЭУГ является более экономичной. Современная наука обладает настолько сложной информацией, что в ее пределах возможно существование множества моделей. Некоторые называют такой либеральный копенгагенизм модельным агностицизмом и даже зететицизмом⁵⁷. К модельному агностицизму примкнуло теперь большинство физиков. Модель ЭУГ вполне соответствует зететическому подходу, которого придерживается Уилсон в рассматриваемой книге.

⁵⁵ Может быть, отсутствие сущности относится к сравнительно простым объектам (скажем, к микрочастицам) и не относится к сложным, таким как микросхема или личность человека. Так, электрон не обладает памятью о прошлых состояниях, а личность обладает. Так что предыстория, будучи запомненной, - это уже сущность. Автор все время говорит о сходстве микромира и психических явлений. Но есть и различия. И это одно из них (память) - А.Р.

⁵⁶ Солипсизм - крайняя форма субъективного идеализма, признающая несомненной реальностью только сознающего субъекта и объявляющая все остальное существующим лишь в его сознании (тенденция к солипсизму характерна для Дж. Беркли, имманентной философии, эмпириокритицизма).

⁵⁷ Зететицизм – (активный) скептицизм, от названия древнегреческой философской школы.

Подобно тому как современная нейрология (скорее – психология – А.Р.) отрицает существование единой личности или «души» аристотелевского толка и говорит о множестве «я» в мозгу каждого человека, одна из ветвей квантовой теории также говорит о множестве «я». Другими словами, и квантовая механика, и наука о мозге утверждают, что все «я» из множества возможных одинаково реальны. В обоих случаях, как и в буддийской теории, о «единой личности» не может быть и речи.

Теорема Белла

В 1965 г. Джон С. Белл опубликовал работу⁵⁸:

Если некоторая объективная вселенная в некотором смысле существует;

Если уравнения квантовой механики структурно подобны (изоморфны) этой вселенной;

То

Некоторый вид нелокальной связи существует между любыми двумя частицами, когда-либо входившими в контакт.

Получается нечто вроде симпатической магии (см.: Фрэзер, *Золотая ветвь*).

Справедливость второго положения теоремы Белла сомнений не вызывает, поскольку 90% современных технологий основаны на квантовой механике. Все доквантовые физические теории, включая теорию относительности, предполагали, что **любые корреляции требуют связей**.

В качестве простой модели мира физики доквантовой эпохи принимали бильярдный стол. Если лежащий на нем шар приходит в движение, причина лежит в механике (удар другого шара), полях (воздействие электромагнитного поля) или геометрии (искривление стола), но без причины шар двигаться не может.

В квантовой механике с 20-х гг. 20 в. нелокальные эффекты - корреляция без связей – казались многим физикам единственным объяснением поведения субатомных систем в некоторых случаях. Бор ввел понятие «нелокальный» в 1928 году. Белл обосновал это понятие математически, показав, что нелокальные эффекты действительно должны иметь место, если квантовая математика действует в наблюдаемом мире.

Представьте себе бильярдный стол без игроков, без тряски, без магнита. На нем внезапно шар А поворачивается по часовой стрелке, а шар Б - против часовой, причем мгновенно. **Эти события не укладываются в теорию причинности, на которую опирается даже магия.**

Юнгианская синхронистичность также содержит подобную нелокальную, некаузальную корреляцию. Большинству ученых из других наук до экспериментального подтверждения теоремы Белла казалось, что только психологи мо-

⁵⁸ Излагается в интерпретации Р. Уилсона.

гут нести такую чушь. Рассмотрим следствия теоремы Белла для модели множественных вселенных.

В последнее десятилетие физики много говорили об «антропном принципе»: мы живем во вселенной, которая как будто специально предназначена для людей (изменения любой физической константы более чем примерно на 0,01% сделало бы появление человека в такой вселенной невозможным). Антропный принцип и предназначение сейчас имеют большее влияние, чем во времена Аристотеля и в теологическую эпоху.

Теорема Белла указывает, что в квантовом мире должны быть корреляции не только в пространстве, но и во времени. А последнее предполагает **возможность путешествия вспять во времени, т.е. настройку Большого Взрыва под человека!** Мы действительно приходим к миру, который изменяется целиком – в прошлом, настоящем и будущем – каждый раз, когда мы производим измерение. Выходит, если бы мышь Эйнштейна случайно включила измерительные инструменты, она действительно могла бы изменить весь мир.

По словам Уилера, наши эксперименты беспрестанно совершают нелокальные путешествия в пространстве-времени в соответствии с теорией Белла. В этих путешествиях они пересекают Большой Взрыв и все остальные события; при этом осуществляется так сказать тонкая настройка Большого Взрыва и вселенная вокруг нас становится антропной. Мы создали ее для себя. Короче говоря, мы не нуждаемся в сверхъестественной фигуре Конструктора. Тем не менее, мне кажется решительно странным (слова Уилсона – А.Р.), что Конструктор появляется в качестве меня, вас и того парня в интерпретации квантовой механики, предложенной более 60 лет назад Эддингтоном (*Философия физической науки*), который не был последователем теории нелокальных корреляций и обратной временной причинности⁵⁹. Неаристотелевская логика имеет дело с экзистенциально-операциональными вероятностями. Аристотелевская логика имеет дело с определенностями, и, ввиду того, что на протяжении всей нашей жизни этих определенностей нам не хватает, аристотелевская логика подсознательно программирует нас на выдумывание фиктивных определенностей⁶⁰.

Эта погоня за фиктивными определенностями, по мнению автора, лежит в основе большинства идеологий и почти всех религий нашей планеты (автор, по-видимому, исключает из их числа буддизм – А.Р.).

Неопределенность (вероятностный характер? – А.Р.) квантовых уравнений – как бы полезны они ни были в привычных технологиях - оставляет вероятностную дыру, через которую однажды может войти новая квантовая теория. Другими словами, тот факт, что мы не можем пока избавиться от неопределенности, не обязательно свидетельствует об ограниченности научного метода (как утверждал Бор) или об ограниченных возможностях научного метода и человеческой нервной системы (как утверждаю я – т.е. Р. Уилсон – А.Р.). Неопреде-

⁵⁹ На наш взгляд, странного здесь ничего нет, поскольку автором не учитывается само появление человека, которое согласно упомянутым представлениям невозможно без тонкой настройки вселенной, в которой человека еще не было. Кто ее провел? – А.Р.)

⁶⁰ Возможно, это имеет и достоинства, поскольку привело к созданию абстрактных понятий энергии, массы и др., без которых было бы невозможно существование современной науки – А.Р.

ленность может попросту свидетельствовать о «незавершенности» квантовой механики. В конце концов, аргумент Эйнштейна (недовольство вероятностным характером квантовой теории – А.Р.) вырос в гипотезу о существовании «скрытой переменной». Предположим, что однажды мы обнаружим переменные, на сегодня неизвестные, которые объяснят «коллапс» вектора состояния. Если это случится, Копенгагенская интерпретация станет историей – вместе с трёхзначной логикой фон Неймана, моделью множественных миров и уродливым потомством Кота Шредингера и Друга Вигнера.

Возражения против существования скрытых переменных

Первое. Скрытые переменные все еще остаются неопределенными и, похоже, могут остаться такими навсегда, превратившись в шум.

Второе. За 50 лет существования квантовой теории не было ни одного доказательства существования скрытой переменной. Научное сообщество решило от этой гипотезы отказаться. Так казалось, пока Бом не предложил новый тест для теоремы Белла, а **доктор Аспект из Орсе не провел этот тест несколько раз и не доказал наличие нелокальной корреляции**. По этому вопросу еще идут споры между физиками. Не доказана невозможность нелокальной скрытой переменной. Если говорят, что две частицы или два события имеют нелокальную корреляцию, это значит, что связь между ними будет сохраняться в отсутствие между ними сигналов, полей, механических сил, энергии и любых других «причин».

Доктор Бом говорит о некоем явном порядке, которым он занимался. Этот явный порядок грубо соответствует аппаратному обеспечению компьютера или нашему головному мозгу. Нейролог доктор Карл Прибрэм (лауреат Нобелевской премии – А.Р.) с помощью модели Бома даже объясняет некоторые загадки функционирования головного мозга.

Относительность Эйнштейна упразднила дихотомию пространства и времени, а современная психосоматическая медицина избавляется от разделения «души» и «тела», модель Бома подрывает традиционный дуализм «сознания» и «материи». Информация, не обладающая локальностью, во многом напоминает индуистское понятие Брахмана, китайское Дао, «Большой Ум» Олдоса Хаксли и «Сознание Будды» буддизма махаяны.

«Сознание Будды» - это не «Бог», - постоянно объясняют буддисты. Западным людям трудно понять религию без «Бога». Но Брахман в индуизме также не имеет ни личности, ни локальности, ни характера (или рода). Доктор Капра в «*Дао физики*» принимает бомовскую нелокальную модель квантовой теории и приходит к выводу, что квантовая теория утверждает то же, что всегда утверждал даосизм.

Доктор Эван Гаррис Уокер идет дальше. В своей работе «*Квантовый антрополог*» (1975) – кстати он физик, а не антрополог – развивает неомовскую модель скрытой переменной, в которой сознание вообще не обладает локальностью и кажется нам локализованным вследствие ошибок нашего восприятия. В этой модели наш «**разум**» **вообще не находится в нашем голов-**

ном мозге, а нелокально пронизывает-трансцендирует пространство-время в целом. Наш мозг просто «настраивает» это нелокальное сознание (что звучит уже совсем в духе хакслиевского «Большого Ума»). Доктор Уокер приводит математическую модель этого нелокального «я» и с ее помощью предсказывает частоту проявления предполагаемого психокинеза парапсихологов. Его результаты подтверждаются теми, у кого успешно получаются опыты с психокинезом. Более подробно сведения о модели Уокера и ее связи с парапсихологией можно найти в его работе или в книге *Новая инквизиция* Уилсона.

Последние достижения квантовой механики открывают возможности для более быстрого продвижения в понимании «паранормальных» и «трансцендентных» состояний. Китайцы определяют нелокальный опыт с помощью отрицаний – «не ум», «неделание», «несуществование» и даже «не-несуществование». Очевидно, нам потребуется еще не менее полувека для научного освоения этого уровня квантовой психологии.

Я бы счел вершиной интеллектуальной лени и ментальной некомпетентности, пишет Р. Уилсон, если бы решил компенсировать словом «Бог» ограниченность моего воображения и словаря. Как я пытался показать в своих нехудожественных книгах и драматически подчеркнуть в художественных, *то, что мы воспринимаем, зависит от того, что мы считаем возможным.* То, что некоторые называют моим «кощунственным оптимизмом», просто основывается на моем фундаментальном агностицизме.

15.1.2. Квантовые парадоксы с позиции физика⁶¹

Рассматриваются концептуальные вопросы квантовой теории измерений, которые находят свое выражение в известных парадоксах, а также в неравенствах Белла. Приводятся аргументы в пользу того, что разрешить эти проблемы вряд ли возможно без непосредственного включения сознания наблюдателя в теоретическое описание квантового измерения. В этой связи обсуждается так называемая многомировая интерпретация квантовой механики, предложенная Эвереттом, а также расширение концепции Эверетта, заключающаяся в том, что разделение квантового состояния на компоненты, соответствующие альтернативным результатам измерения, не только связывается с сознанием наблюдателя, но и полностью отождествляется с ним. Показывается, что такой подход открывает качественно новые перспективы объединения физики и психологии и, более широко, естественнонаучной и гуманитарной сфер познания. Это может привести к расширению теории сознания и пролить свет на важные и до сих пор не понятые явления в сфере сознания.

В 2000 году редакцией журнала «Успехи физических наук» была инициирована дискуссия по методологии квантовой физики. Особенность квантовой физики, отличающая её от всей остальной физики, состоит в том, что процесс измерения в ней не удастся представить как вполне объективный, абсо-

⁶¹ М.Б. Менский. Концепция сознания в контексте квантовой механики // Успехи физических наук, 2005, Т. 175, №4, С. 413-432.

лютно не зависящей от наблюдателя. Эта черта квантовой механики противоречит нашей интуиции и при первом знакомстве неизбежно вызывает непонимание и порождает «проблемы измерения». Ни решить её должным образом, ни отказаться от неё как от ненаучной не удастся вот уже несколько десятилетий.

В отечественной литературе эта проблема практически не обсуждалась, хотя в пятидесятых годах она вызывала бурные и эмоциональные дискуссии. За рубежом, напротив, обсуждение этого вопроса в физической литературе активизировалось и стало более широким. Так или иначе, недостаточное понимание сути вопроса среди физиков существенно снизило уровень дискуссии.

В первой части статьи показывается, почему процедура редукции состояния является отступлением от квантовой механики и истолковывается апелляцией к понятию «классический прибор» (как в копенгагенской интерпретации квантовой механики), взаимодействие с которым каким-то таинственным образом меняет линейность квантовой механики. Вместо этого можно апеллировать к сознанию наблюдателя, явным образом введя его в описание измерения, как это сделано в интерпретации Эверетта (многомировой)⁶².

Во второй половине статьи автор подробно останавливается на этой интерпретации, которая представляется наиболее перспективной для решения проблемы измерения. Автор опирается на гипотезу Эверетта об отождествлении сознания с разделением квантового мира на классические альтернативы, соответствующие альтернативным результатам измерения. Полное отождествление сознания с тем, что происходит при измерении радикально меняет точку зрения на всю проблему и особенно на феномен сознания. В результате возникает связь между физикой и психологией и, в более общем плане, между естественнонаучной и гуманитарной сферами человеческого познания.

Одна из особенностей квантового измерения состоит в том, что квантовую систему невозможно измерить (т.е. получить какую бы то ни было информацию о ней) не возмущив при этом ее состояние, причем тем сильнее, чем больше информации извлекается при измерении. Многие физики не знают да и знать не хотят о «проблеме измерения». Она и действительно необычна, хотя бы потому, что наиболее ясные ее формулировки имеют форму парадоксов, например парадокс кота Шредингера и парадокс друга Вигнера (1961 г.). А физики практического склада не интересуются парадоксами, коль скоро задачи, которые им нужно решить, можно сформулировать корректно.

Рассматривая парадокс кота Шредингера и друга Вигнера, автор делает заключение о том, что описание состояния системы зависит от того, осознал ли экспериментатор состояние системы или нет. Если в сознание наблюдателя входит информация о результате измерения, то описание состояния становится таким, которое не может получиться при эволюции, описываемой линейным оператором.

Декогеренция – это переход чистого состояния в смешанное.

⁶² Подробное рассмотрение реальности с позиции многих миров дано в книге Дэвида Дойча, физика-теоретика, корифея квантовых вычислений: Д. Дойч. Структура реальности. – М – Ижевск: Изд-во РХД, 2001.

Чрезвычайно существенно, что особенности квантовых измерений невозможно объяснить (разрешить парадоксы, по крайней мере, на современном этапе познания) никаким логически простым способом.

Неравенства Белла возникают при анализе экспериментов типа Эйнштейна – Подольского – Розена (ЭПР). Наиболее наглядная форма опыта типа ЭПР заключается в распаде частицы со спином 0 на две со спином $+1/2$ и $-1/2$. Существование хотя бы вероятностного распределения спинов еще до измерения характерно для классической физики и получило название *«локальный реализм»*. Белл показал, что в предположении локального реализма результаты измерений в опыте ЭПР обязательно должны удовлетворять некоторым неравенствам (Белла). Таким образом, проведя измерения и проверив, выполняются ли неравенства Белла, можно проверить, имеет ли место локальный реализм.

Выполнение этих неравенств было проверено (правда, не с частицами спина $1/2$, а с поляризованными фотонами, но это эквивалентная ситуация) экспериментально. Первый результат был опубликован Аспектом с соавторами. Оказалось, что неравенства Белла нарушаются. Следовательно, предположение об априорном существовании распределения по проекциям спинов (из которого выводятся неравенства Белла) экспериментально опровергнуто. Это значит, что неверным оказывается привычное (и обязательное в классической физике) представление о том, что свойства, наблюдаемые при измерении, реально существуют еще до измерения. При квантовых измерениях это не так: свойства, обнаруженные при измерении могут вообще не существовать до измерения.

Суперпозиция, существовавшая до измерения, не исчезает в результате действия прибора, по крайней мере, до тех пор, пока наблюдатель не осознает результат измерения. Изменения, при котором исчезают все члены суперпозиции, кроме одного, было введено в квантовую механику постулатом *редукции фон Неймана* (коллапс волновой функции).

Постулат редукции в квантовой механике кажется чужеродным, он делает ее эклектичной. Почему система должна иначе эволюционировать, когда она подвергается измерению? Возможны поиски другого пути, не опирающегося на картину редукции, для избавления от парадоксальности квантовой механики. Один из многообещающих путей для этого – отказ от постулата редукции в рамках концепции Эверетта, о которой мы будем говорить далее.

Проблема измерения: этапы исследования

Первый этап был реализован основателями квантовой механики и дал копенгагенскую интерпретацию, основанную на редукции фон Неймана. Когда стало ясно, что первый этап мало что дал для решения «проблемы измерения», начался второй этап, который проходил в рамках копенгагенской интерпретации. Вопрос о понимании стал казаться лишним.

В 1957 г. вышла статья Эверетта, в которой была предложена очень смелая и принципиально новая «многомировая» интерпретация квантовой механики. Постепенно она приобрела вес. Этот этап начался два десятилетия назад и

продолжается до сих пор. Квантовая механика изменилась за это время по существу, став инженерной наукой и охватив большое число физиков. Квантовая механика осваивала все новые области, поэтому консерватизм квантово-механического сообщества значительно уменьшился. На этом этапе появилась необходимость описывать не только ансамбли, но и индивидуальные системы. Ансамблевая идеология, в которой концептуальных проблем вообще не возникает, стала явно недостаточной.

Кроме того, появились принципиально новые приложения квантовой механики – квантовая информатика – , которые включали квантовую криптографию, квантовую телепортацию и, главное, квантовый компьютер. Возникшие на этой основе новые технологии существенно использовали как раз те специфические черты квантовых систем, которые порождают «проблему измерения». Для разработки квантово-информационных систем вообще и квантовых компьютеров в особенности нужно было гораздо более глубокое понимание сути квантовой механики, ее отличий от классической. Помимо этого, нужно было уметь корректно описывать поведение таких систем, которые обладают одновременно и квантовыми, и классическими свойствами.

Концепция Эверетта и разделение альтернатив

Многомировая интерпретация, или интерпретация Эверетта, ранее считавшаяся слишком фантастической, в последние два десятилетия активно обсуждается и принята большим количеством специалистов. Достаточно полные сведения по этому вопросу можно найти в обзоре Вайдмана, включенном в стэнфордскую энциклопедию по философии⁶³. Автор пользуется ею. Отметим еще раз, что постулат редукции фон Неймана чужд квантовой механике и принят в ней (ценой эклектичности) лишь для того, чтобы быстро и легко обойти концептуальные проблемы, не решая их по существу, и перейти к практическим расчетам.

Так, согласно редукции фон Неймана, от исходной двухкомпонентной суперпозиции остается лишь одна (та или иная) компонента, а линейность квантовой механики требует, чтобы все члены суперпозиции сохранились. При измерении происходит лишь запутывание измеряемой системы с окружением. Концепция Эверетта пытается учесть этот аргумент последовательно. Нельзя выбросить ни одного члена из этой композиции, коих может быть много, даже бесконечное число. Если их не выбрасывать, то все их нужно интерпретировать, что и сделал Эверетт.

В концепции Эверетта (точнее в эквивалентной ей многомировой интерпретации) предполагается, что различные члены суперпозиции соответствуют различным классическим реальностям, или классическим мирам, которые равноправны (картина многих миров Эверетта – Уиллера - ДеВитта). Как же быть с сознанием наблюдателя? Оно расслаивается на столько же миров, и в каждом

⁶³ Vaidman L. “The many-worlds interpretation of quantum mechanics”, in Stanford Encyclopedia of Philosophy (Electronic Resource). Stanford University, 2002. <http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/qm-manyworlds>.

видит то, что этому миру присуще. Условно можно сказать, что сознание разделяется на компоненты, каждая из которых воспринимает лишь один классический мир. Однако согласно концепции Эверетта, на самом деле имеются как бы «двойники» этого наблюдателя, ощущения которых дают каждому из них картину того мира, в котором «живет» именно он. Ситуация трудна для понимания: Все альтернативы реализуются, и сознание наблюдателя разделяется между всеми альтернативами. Однако индивидуальное сознание субъективно осуществляет выбор (селекцию) одной альтернативы. В любом эвереттовском мире все наблюдатели видят одно и то же с точностью до погрешностей их восприятия. На первый взгляд концепция фантастическая и слишком сложная.

Однако не только ветвление мира, но даже представление о том, что измерение происходит одновременно сразу во всех точках конечной области (в которых отлична от нуля волновая функция) является излишне упрощенным и не соответствующим специальной теории относительности (СТО). Согласно СТО одновременность событий в различных точках вообще нельзя определить. Все эти трудности возникают из-за идеализации мгновенного измерения. Они исчезают при переходе к картине непрерывного измерения (далее: коридоры путей)

Имеется одно действительно существенное возражение против концепции Эверетта: эту концепцию невозможно проверить. Мы же считаем, что концепцию Э. можно проверить, правда, экспериментами особого рода - наблюдением над индивидуальным сознанием. Об этом поговорим в конце статьи, а сейчас уточним, как понимать сознание в рамках концепции Эверетта.

Отождествление сознания с разделением альтернатив.

Два аспекта квантового измерения – декогеренция и селекция (выбор) альтернативы имеют различный статус в квантовой механике. В декогерентности нет ничего непонятного. Она порождается запутыванием (entanglement) измеряемой системы с измерительным прибором из-за их взаимодействия.

Чужеродным квантовой механике является второй аспект квантового измерения – селекция одного из всех имеющихся альтернативных результатов. Альтернативно селекцию можно описать как переход от чистого (но запутанного) состояния измеряемой системы и прибора к состоянию, описываемому лишь одной из компонент этой суперпозиции. Законами эволюции квантовых систем такой переход (редукция состояния) не предусмотрен. Как уже отмечалось, введен он в квантовую теорию измерений (в форме постулата редукции) искусственно, чтобы описать то, что наблюдается реально при измерениях квантовых систем классическими приборами, однако это описание эклектически соединяет квантовую теорию с классической. Если считать квантовую теорию правильной и быть последовательным, то нужно признать, что редукция вообще не может происходить и следует исключить ее из теории. Это и делается в концепции Эверетта. Требуется, однако, как-то объяснить, почему наблюдатель всегда видит лишь одну альтернативу.

Селекция альтернативы происходит в сознании наблюдателя. Так считал и Эверетт. Мы же усилим это положение, и будем считать, что **сознание отождествляется с селекцией альтернативы**. Сознание будем понимать расширительно: способность человека (и любого живого существа), называемая сознанием, - это то же самое явление, которое в квантовой теории измерений называется редукцией состояния или селекцией альтернативы, а в концепции Эверетта фигурирует как разделение квантового мира на классические альтернативы. Эта гипотеза отождествления не является совершенно новой. Она тесно связана с такими вариантами интерпретации Эверетта, как понятие **«многих миров»**. Нам представляется, что наша интерпретация легче для понимания и более плодотворна.

Сознание оказывается общей частью квантовой физики и психологии, а тем самым – общей частью естественнонаучной и гуманитарной сфер. Речь идет о самом глубоком (и самым примитивном) пласте сознания, лежащем на границе сознания.

Уточним понятие измерения и его альтернативных результатов, перейдя от мгновенных к непрерывным измерениям. Непрерывное измерение можно представить как последовательность большого количества мгновенных измерений. Простейшим примером спонтанно возникающего непрерывного измерения может служить квантовая диффузия. На своем пути диффундирующая частица взаимодействует с молекулами среды. В результате состояние молекул меняется, так что в резервуаре (т.е. окружающей среде) остается информация о положении движущейся частицы и ее импульсе, происходит измерение (с некоторым конечным разрешением) траектории этой частицы. Обратное влияние окружающей среды (резервуара) на частицу можно рассматривать как эффект ее измерения этой средой.

Классические альтернативы – условие существования жизни

Требование классичности альтернатив позволяет построить теорию измерений, которая соответствует наблюдениям. Требование классичности альтернатив можно обосновать теоретически, если принять интерпретацию Эверетта и ее расширение, т.е. отождествить разделение альтернатив с сознанием.

Если принять концепцию, которая обсуждалась в этом разделе, то можно сказать, что классического мира вообще объективно не существует, а иллюзия классического мира возникает лишь в сознании живого существа. Интересно, что к такому странному с точки зрения физики выводу приводит сама физика, правда, лишь в том случае, если мы доводим её до логической полноты, избегая удобной эклектики типа копенгагенской интерпретации с постулатом редукции.

Возникает вопрос можно ли проверить сказанное в отношении сознания? В следующих разделах мы обсудим, как можно подтвердить это предположение наблюдением над сознанием. А сейчас заметим, что прямыми физическими экспериментами можно проверить, по крайней мере, принципиальную возможность реального существования такого «квантового сознания». Для этого нужно построить его модель с помощью квантового компьютера.

Действительно, в квантовом компьютере эволюционируют квантовые состояния, представляющие собой суперпозиции (чего? – А.Р.) с большим числом компонент. Каждая компонента суперпозиции несет некоторую информацию, например, двоичное число, а эволюция всей суперпозиции обеспечивает **квантовый параллелизм**, т.е. одновременное преобразование всех этих вариантов классической информации. В модели квантового сознания отдельные компоненты суперпозиции могут моделировать альтернативы, на которые сознание разделяет квантовое состояние, а информация, содержащаяся в каждой компоненте, – состояние живого существа и его окружения. Задача состоит в том, чтобы сформулировать **критерий выживания** и подобрать закон эволюции таким образом, чтобы эволюция каждой из альтернатив (компонент суперпозиции) была предсказуемой и выживание в этой эволюции возможным. При наличии квантового компьютера задача эта принципиально разрешима.

Как известно, квантовые компьютеры, которые сулят необыкновенные новые возможности, до сих пор не реализованы, и некоторые даже сомневаются, что они будут реализованы в будущем (об этом сказано в обзоре Валиева, УФН, 2005). Однако это относится к компьютерам с числом ячеек порядка тысячи и более. Что же касается квантовых компьютеров с числом ячеек порядка десяти, то они реализованы уже сейчас. Возможно, что уже на таких маломощных компьютерах в сравнительно близком будущем можно попытаться реализовать модель «квантового сознания».

На краю сознания

1. Сознание может сделать вероятным некоторое событие, даже если по законам физики (квантовой механики) вероятность этого события мала. Тогда происходящее может выглядеть как чудо. Правда, не всякое чудо возможно, а только чудо с ненулевой вероятностью.

2. В рамках концепции Эверетта становится возможной еще одна радикальная гипотеза. В этой концепции сознание в целом охватывает весь квантовый мир, т.е. все его «классические проекции». Представляется вполне возможным, что индивидуальное субъективное сознание, которое живет в некотором эвереттовском мире (в некоторой классической реальности), при определенных условиях может выходить в квантовый мир в целом, «заглядывать» в другие альтернативы, в другие реальности, а не сводить все к одной альтернативе, одной редукции. Ибо все альтернативы одинаково реальны, а сознание просто выбирает одну из них. Тогда человек способен не только мысленно представить, но также непосредственно воспринять некоторую «другую реальность», в которой он также мог бы жить.

Для этого перегородки между альтернативами должны исчезать или становиться проницаемыми. Поскольку появление перегородок – это осознание, то **перегородки исчезают или становятся проницаемыми «на границе сознания»**, когда сознание почти исчезает. Такие состояния называются **трансом**.

3. «Отождествление» разделения альтернатив в квантовой физике с явлением осознания в психологии следует понимать как отождествление самых

глубоких слоев соответствующих явлений, принцип, на котором эти явления основаны, но не их проявления, которые в столь разных сферах могут быть совершенно непохожими.

Среди тех необычных явлений в области психики, которые могут иметь отношение к нашей концепции, упомянем особые состояния сознания типа транса, в частности *состояние сознания во время сна*, а также *невербальное и неконтролируемое мышление, которое играет большую роль в науке* и для объяснения которого, по мнению Пенроуза [49, гл. 10], необходимо привлечь квантовую физику.

Явление невербального мышления известно меньше. Поясним, что имеется в виду. Обычно мышление ученого считают строго логичным. И это действительно так на первом и заключительном этапах (когда формулируется проблема и когда формулируются результаты ее решения). Но ключевой этап работы ученого, который собственно и приносит результат, это открытие. И оказывается, что на этом этапе мышление ученого часто, а может быть и всегда, принимает невербальную форму и происходит неконтролируемо, независимо от его воли (однако после напряженной и вполне контролируемой работы на предшествующих этапах).

Роджер Пенроуз в книге «Новый ум короля» [49] приводит примеры важных открытий, сделанных в невербальной форме. Быть может самое поразительное в приводимых им свидетельствах великих ученых – это то, что в *момент открытия при отсутствии формальных доказательств истинности своего прозрения они чувствуют, что оно истинно*. Это необыкновенное и в то же время чрезвычайно важное явление невозможно объяснить обычным способом. Кажется возможным объяснить это тем, что *сознание в этот момент выходит в квантовый мир*. Напрашивается аналогия, что *научное открытие происходит «на границе сознания»*. Отсюда следует практическая рекомендация. После напряженной предварительной работы над проблемой, в момент, когда требуется «угадать ключ к её решению», полезно на время «отключить» сознание от этой проблемы, переориентировав его на что-то другое, даже на развлечение. Работа над проблемой будет продолжаться теперь уже на уровне подсознания (или сверхсознания), что и требуется для «открытия». Близкие рекомендации часто встречаются в литературе по научной методологии.

Есть и еще много удивительных явлений в сфере сознания, и многие из них, по-видимому, вполне достоверны. Надежда на то, что они могут получить объяснение, оправдывает некоторый риск, на который приходится идти, делая предположения, формально пока недоказуемые.

4. Необыкновенные проявления сознания соблазнительно для ученого вообще исключить из рассмотрения как ненаучные. Однако вряд ли можно так легко отмахнуться от того, что существует тысячелетия и представляет, быть может, наиболее устойчивое явление в сфере духовной жизни человека. Восточные философии прямо призывают человека работать с собственным сознанием (дзен-буддизм и близкие к нему направления). Дзен – это то трудноуловимое состояние, которое невозможно точно передать словами, но приблизительно можно охарактеризовать как «корень сознания», «начало сознания» или

«предсознание». Это то трудноуловимое состояние, которое предшествует появлению сознания. Учеников призываются работать со своим сознанием до тех пор, пока они не смогут уловить это ощущение *«быть между сознанием и отсутствием сознания»*.

Нетрудно видеть, что понятие «дзен» очень похоже на тот наиболее глубокий или наиболее примитивный пласт сознания, который в концепции Эверетта можно отождествить с разделением альтернатив.

Необходимость новой методологии

Принимая в концепции Эверетта гипотезу об отождествлении сознания с разделением альтернатив и получая расширенную концепцию Э., мы замечаем, что в таком виде ее можно проверить. Правда, эта проверка уже не вписывалась бы в рамки привычной методологии физики. Она предполагает работу с индивидуальным сознанием. В этом случае воспроизводимости результатов, столь важной в науке, не так-то легко достигнуть (йога! – А.Р.). Не говоря уж об объективности! Ведь для скептика вероятность увидеть маловероятное событие («чудо») остается малой.

Приходится признать, что, рассматривая предположение о влиянии сознания на вероятности альтернатив, следует гораздо более осторожно, чем это принято в естественных науках, рассматривать критерии истинности. Это значит, что либо расширенная методология Эверетта не может быть включена в русло физики (и вообще естественных наук), либо методология этих наук должна быть существенно расширена. Новая методология должна, во-первых, допускать эксперименты с индивидуальным сознанием или наблюдения над ним в качестве инструмента для проверки теории, а во-вторых, учитывать *возможное влияние априорных установок на результаты наблюдений*.

Было бы очень странно, если бы рассмотренное нами расширение концепции Эверетта, было бы отвергнуто только потому, что оказалось несовместимым с существующей научной методологией. Скорее всего, если отмеченные возможности получат подтверждение, работа в этом направлении будет продолжена. По аналогии с внедрением неевклидовых геометрий на заре теории относительности.

Заключение. Ситуация, сложившаяся с «проблемой измерения» в квантовой механике, уникальна. Скоро уже век, как эта неожиданно возникшая проблема не решается. При решении такой проблемы следует быть готовым к неожиданностям, чтобы не забраковать ростки истины из-за того, что они выглядят непривычно.

На наш взгляд, решение будет достигнуто в направлении, намеченном концепцией Эверетта, которая в последние десятилетия привлекает очень большое внимание. В контексте новых квантово-механических задач, в частности теории и практики квантовых компьютеров, некоторые исследователи (в частности Дэвид Дойч [37]) используют концепцию Э. как удобный язык для конкретных исследований. Хотя это и субъективно, но в концептуальных исследованиях концепция Э. видимо дает новое качество. Нам кажется перспек-

тивным дальнейший шаг – полностью отождествить сознание с разделением квантового мира на эвереттовские альтернативные миры. Важно, что так расширенную концепцию в принципе можно проверять наблюдением над индивидуальным сознанием. Близкие (в некоторых пунктах совпадающие) построения предпринимались разными авторами, что видно из ссылок. Особенно много писали о связи сознания с редукцией функции состояния как в рамках концепции Эверетта, так и вне её.

Резюме в связи с расширенной концепцией Э.

1) Набор альтернатив, характерный для квантовой теории измерений, интерпретируется как множество равноправных проекций квантового мира, называемых эвереттовскими мирами.

2) Разделение квантового мира на альтернативы отождествляется с функцией живых организмов, называемой сознанием.

3) Классический характер каждой из альтернатив определяется тем, что обеспечивает стабильность и предсказуемость окружающего мира, как он воспринимается сознанием, что является необходимым условием жизни.

4) В особых состояниях (на грани бессознательного) индивидуальное сознание получает доступ к квантовому миру за рамками одной классической проекции. Это может объяснять наблюдаемые иногда необычные явления в области психики, которые играют центральную роль в ненаучных формах познания духовной жизни человека (восточные философии, религия).

Пункт 3 наиболее важен. Он объясняет, почему при измерении (осознавании) происходит расслоение квантового мира именно на классические альтернативы (являющиеся проекциями единственно реального квантового мира). Эта ситуация оказывается необходимым общим свойством всех живых существ, т.е. определением жизни. В.Л. Гинзбург [54, гл. 1] выделяет среди трех «великих» проблем проблему интерпретации квантовой механики и вопрос о редукционизме, т.е. вопрос о том, можно ли объяснить феномен жизни на основе уже известной физики. Мы видели, что концепция Э. естественно соединяет в себе обе эти проблемы и в известном смысле сводит одну из них к другой.

Более того, последняя из трех «великих» проблем [54], вопрос о возрастании энтропии, необратимости и «стреле времени» [14] может иметь отношение к обсуждаемой нами концепции. Мир, подчиняющийся квантовой механике, из которой исключен постулат редукции, остается обратимым. Необратимость, проявляющаяся как выбор той или иной альтернативы, фигурирует лишь как феномен сознания. Другими словами, для квантовой механики, описывающей неживую материю, характерно описание в терминах 4-мерного пространства-времени, в котором все моменты времени рассматриваются как равноценные, а представление о «ходе времени», об отношениях между настоящим, будущим и прошлым, а с ними и необратимость появляются лишь при описании феномена жизни.

В изложенной программе, как и вообще в области концептуальных проблем квантовой механики, многое нельзя обосновать и приходится принимать в качестве гипотез, что может создать впечатление дилетантизма. Однако на самом деле такой характер исследований неизбежен в данной области науки на

данном этапе. Дело в следующем. Даже после того, как особая роль сознания в квантовой теории измерений стала казаться очевидной, решение вопроса пытались найти в привычном для физиков направлении: описать свойства той материальной субстанции, которая порождает сознание (это мог быть мозг или какая-нибудь структура внутри него). Серьезные надежды возлагались в этой связи на теорию декогеренции. Однако со временем стало ясно, что усилиями в этом направлении проблему решить не удаётся. С этого времени все чаще стали понимать сознание как некое явление, которое можно описать феноменологически, но нельзя вывести из известных свойств (квантовой) материи. Ясно, что элементы такого описания могут вводиться в теорию лишь как гипотезы. Т.о., наличие гипотез указывает скорее не на дилетантизм подхода, а на то, что мы имеем дело с начальным этапом нового направления в науке.

Работа в рамках концепции Э. требует расширения методологии и в каком-то смысле выводит за рамки физики и даже вообще естественных наук. Это, конечно, должно вызывать настороженность и критику. Однако вопрос кажется чрезвычайно важным, и это оправдывает даже рискованные шаги. В случае успеха в решении концептуальных проблем квантовой механики наверняка эта наука, да и вообще физика, поднимется на качественно новый уровень понимания природы. Можно надеяться, что возникнет продуктивный симбиоз физики с психологией, да и с другими средствами познания духовной жизни человека. [5]. Главным в этой «проблеме века» является, на наш взгляд, поиск не математических, а концептуальных решений.

Резюме по 15.1. Тенденция к сближению физики с психологией, или даже в целом естествознания с гуманитарными науками, видны в том, что с позиций психологии приходят к физике, а с позиций физики – к психологии. В предчувствии будущего квантового компьютера физик говорит о возможности построения простейшей модели сознания.

15.2. Квантовый компьютер

Информатика, как и термодинамика, пользуется понятием энтропии (как меры неупорядоченности) – энтропии по Шеннону. В свое время Д. Максвелл в поисках оружия против «тепловой смерти» изобрел своего «демона» - мифическое существо, которое могло наблюдать молекулы и управлять ими. Разделив сосуд с газом на две части и собирая более быстрые молекулы в одной из них, демон смог бы, не производя работы, уменьшить энтропию системы.

15.2.1. Классические и квантовые приборы

Главные технические достижения XX века связаны с развитием квантово-механических представлений о материи. Лазерная техника основана на знании квантовых спектров электронов в газах, полупроводниках и диэлектриках. Квантовая теория зонной структуры спектров электронов в полупроводниках служит базисом физики транзисторов. Атомная энергетика построена на понимании квантовых законов строения атомного ядра.

Хотя функционирование лазеров и транзисторов основано на использовании квантовых свойств материи, эти приборы, тем не менее, чаще всего работают в классическом режиме. Действительно, токи электронов и напряжения на электродах транзисторов являются классическими величинами, полученными в результате усреднения по большому ансамблю частиц. Аналогично, когерентное лазерное излучение описывается законами классической электродинамики.

«Классичность» лазерного излучения обеспечивается наличием большого ансамбля квантов лазерного излучения. При переходе в режим одиночных фотонов (одноатомные лазеры) лазер становится квантовым прибором в том смысле, что не только его функционирование основано на квантовых законах, но и его излучение представляет собой квантовый объект, например одиночный фотон. Транзистор в одноэлектронном режиме может стать квантовым прибором, если динамика электрона описывается квантовым уравнением Шрёдингера (так называемый баллистический режим транзистора). Таким образом, один и тот же прибор может работать как в классическом, так и в квантовом режиме. Будем считать понятие «классический прибор» и «прибор, работающий в классическом режиме», тождественными. Функционирование классического прибора описывается уравнениями классической физики для классических переменных.

Под квантовым прибором будем понимать прибор, работающий в квантовом режиме. Квантовый режим означает, что динамика прибора описывается уравнением Шрёдингера для волновой функции. Аргументами волновой функции выступают квантовые переменные (координаты импульса, спины частиц). Волновая функция квантовой системы обладает *квантовой когерентностью* в том обычном смысле, что она способна к проявлению явлений интерференции при сложении различных компонент волновой функции. Свойство когерентности волновой функции, описывающей квантовый прибор, является его важнейшей отличительной чертой. Термин «квантовый прибор» мы используем как вариант термина «квантово-когерентный прибор».

До сих пор все машины, используемые человеком в практической деятельности, были классическими. Тем не менее, техническую революцию XX века в информатике и энергетике правомерно называть *первой квантовой революцией*, настолько тесно она связана с квантовой физикой. Представим теперь, что мы преодолели технологические и другие трудности, стоящие на пути квантово-когерентных приборов, и создали новое поколение машин и технических систем, обеспечивающих использование квантовых технологий в практической деятельности. Это было бы осуществлением *второй квантовой революции*.

Законы классической и квантовой физики имеют принципиальные различия. Квантовая техника и технологии должны помочь преодолеть установленные для классической техники пределы и ограничения. Возможно, например, преодолеть дифракционный предел разрешения в квантовой оптической микроскопии и квантовой оптической литографии, построить «абсолютно секретные» квантовые линии связи (квантовая криптография). В квантовой метрологии возможно увеличение чувствительности интерференционных приборов на не-

сколько порядков величины. Квантовые компьютеры могут обеспечить решение задач, считающихся «не решаемыми» на классических компьютерах.

Бурный рост интереса к экспериментам по квантовой динамике частиц в последней четверти XX века связан с появлением ряда принципиально новых экспериментальных методик, дающих возможность удерживать отдельные атомы, ионы, электроны, охлаждать их до сверхнизких температур (вплоть до уровня нанокельвин), в том числе и с помощью лазерных методов охлаждения, перемещать их и, главное, управлять их квантовой динамикой.

В ловушках Пауля были осуществлены состояния вещества, называемые одномерными ионными кристаллами. В них цепочка ионов удерживается вместе внешними статическими и переменными электрическими полями от разбегания, обусловленного кулоновским отталкиванием ионов. Поля можно выбирать так, чтобы равновесное расстояние между ионами составляло несколько микрометров, что позволяет воздействовать на каждый ион отдельно, например сфокусированным лазерным лучом, управляя эволюцией квантового состояния иона. Такая структура служит популярной моделью для экспериментов по созданию одного из прототипов квантового компьютера.

Похожая одномерная цепочка атомов фосфора ^{31}P может быть погружена в бесспиновый диэлектрический кристалл кремния ^{28}Si , охлажденного до температур порядка 1 мК. Квантовой динамикой ядерного и электронного спинов атомов ^{31}P можно управлять методами импульсного ядерного и электронного магнитного резонанса. Селективный доступ к отдельному атому достигается настройкой его резонансных частот путем управления электронной структурой атома электрическими полями на нанозлектродах. Для построения такой структуры необходимо развивать и использовать методы так называемых нанотехнологий с атомным разрешением. Другие предложения по созданию элементов квантовых компьютеров на основе твердого тела основаны на физике низкоразмерных электронных систем в полупроводниках – двумерного электронного газа, электронов в квантовых проволоках и квантовых точках. Эти структуры изготавливаются методами молекулярной эпитаксии и нанолитографии.

15.2.2. Сложность алгоритмов

Алгоритм реализуется некой схемой операций N_n (здесь n - размер задачи), зависящей от n . Эффективными алгоритмами принято считать полиномиальные P , т.е. такие, у которых схема N_n состоит из полиномиального числа операций. Эффективным алгоритмам класса P противопоставляются неэффективные, требующие экспоненциально больших ресурсов (времени, памяти, точности). Например, если $t_n \propto 2^n$, алгоритм причисляется к неэффективным. Примером задачи, для которой не найдено эффективного алгоритма решения на классическом компьютере, является задача о вычислении простых множителей больших n -разрядных чисел (задача о факторизации чисел).

В 1994 году Шор построил алгоритм решения этой задачи на квантовом компьютере, который оказался полиномиальной сложности. Этот результат оказался сенсационным, поскольку опровергал *эмпирический закон (тезис)*

Чёрча-Тьюринга: все компьютеры эквивалентны в том смысле, что переход от одного компьютера к другому не изменяет класса сложности задачи. Этот тезис, сформулированный для множества классических компьютеров нарушается, если множество включает квантовые компьютеры.

Для физиков результат не оказался неожиданным, поскольку информация не является только математическим понятием. Она имеет физического носителя: кодируется, хранится, обрабатывается, передается, записывается, стирается путем изменения состояния носителя информации. Наличие глубокой связи между физикой и информацией обнаруживается при сопоставлении термодинамической энтропии в физике и информационной энтропии Шеннона в теории информации. Они совпадают с точностью до постоянного множителя.

Принципиальные различия между классическими и квантовыми законами физики обуславливают и принципиальные различия между классической и квантовой информацией, а также методов их обработки. К замечательным достижениям классической теории информации относится разрешение парадокса с демоном Максвелла, нарушающим второй закон термодинамики. Парадокс исчезает, если учесть энергозатраты на стирание информации. Стирание 1 бита информации сопровождается потерей энергии $kT \ln 2$ и возрастанием энтропии на такую же величину (принцип Ландауэра, 1961).

15.2.3. Кубиты

Терминами «бит» и «кубит» обозначают как единицы классической и квантовой информации, так и носители этой информации (1 бита или кубита соответственно). В магнитной памяти компьютера битом служит намагниченная область: двум направлениям намагниченности соответствуют значения «0» и «1» бит информации. Переключение между этими двумя состояниями требует преодоления энергетического барьера. Его наличие и обеспечивает надежность хранения информации.

В оперативной памяти компьютера носителем информации является триггерная транзисторная схема. Здесь состояния «0» и «1» также разделены энергетическим барьером. Более того, состояния с минимальной энергией являются аттракторами, к которым система эволюционирует из множества состояний, окружающих аттрактор. Аттракторы также разделены энергетическими барьерами.

Примером управляемого бита, используемого в системах обработки информации является инвертор, построенный на двух транзисторах (рис. 7.2).

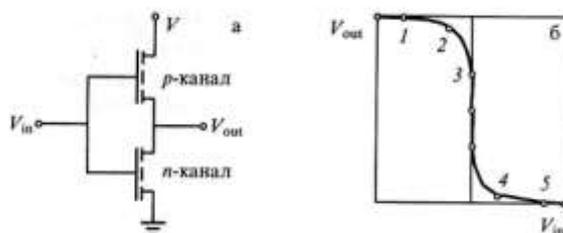


Рис. 7.2. Схема классического инвертора на двух полевых транзисторах (а) и передаточная характеристика инвертора (б). Состояния «0» и «1» на входе (V_{in}) и выходе (V_{out}) кодируются значениями электрического напряжения.

Инвертор выполняет логическую операцию НЕ (NOT). Базовым элементом квантового компьютера является квантовый бит – кубит. В системах квантовой связи информация передается путем физического переноса кубита – носителя информации или методом телепортации квантового состояния кубита.

В качестве кубита может быть выбрана любая квантовая система с двумя состояниями, характеризуемыми ортонормированными волновыми функциями $|\varphi_0\rangle$ и $|\varphi_1\rangle$. Удобным примером кубита является ядерный или электронный спин $I=1/2$, который в постоянном магнитном поле \mathbf{B} имеет два уровня энергии:

$$E_0 = -\frac{1}{2}h\gamma B, \quad E_1 = \frac{1}{2}h\gamma B,$$

соответствующих направлениям спина вдоль поля или против поля (рис. 7.2).



Рис. 7.3. Схема квантового бита – кубита. Логические состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$ соответствуют собственным функциям энергии спина $I = 1/2$ или проекции I_z в постоянном магнитном поле B .

В других популярных реализациях состояниями кубита выбирают орбитальные состояния электрона в квантовых ямах или квантовых точках. Состояния «0» и «1» электрона в квантовых точках могут быть разделены потенциальным барьером, как в реализации классического бита. Тем не менее в квантовом случае состояние «1» сохраняет неустойчивость по отношению к распаду «1» «0» благодаря возможности туннельного перехода сквозь барьер. Управление динамикой кубита выполняется лазерными импульсами через возбужденные уровни энергии электрона.

Большой интерес вызывают реализации кубитов с использованием сверхпроводниковых структур. В зарядовом сверхпроводниковом кубите состояниям «0» и «1» соответствуют отсутствие и наличие заряда одной куперовской пары на металлической сверхпроводящей квантовой точке. Состояниям «0» и «1» кубита в скивде (сверхпроводниковое кольцо с переходами Джозефсона в магнитном поле) соответствуют сверхпроводниковые токи в противоположных направлениях. Большое число экспериментов выполнено на кубите – одиночном фотоне. Любые два состояния фотона с ортогональными поляризациями могут быть выбраны как состояния «0» и «1» кубита.

15.2.4. Квантовая когерентность векторов состояния

Состояния квантовой системы, описываемые векторами состояния $|\psi\rangle$, называются чистыми. Им противопоставляются так называемые смешанные состояния, которые нельзя описать векторами состояния. Чистые и смешанные состояния квантовых систем принципиально различаются по признаку когерентности: **чистые состояния когерентны, смешанные – не когерентны**. Понятие когерентности в квантовой физике определяется аналогично понятию когерентности в оптике: волновые функции (векторы состояния) квантово-когерентных систем способны к интерференции. Знаменитый эксперимент по наблюдению дифракции электронов на двух щелях, по сути, является экспериментом по выявлению квантовой когерентности орбитальной волновой функции свободного электрона.

15.2.5. Идеальный квантовый компьютер



Рис. 7.4. Схема квантового компьютера

Схема квантового компьютера представлена на рис. 7.4. По существу квантовый компьютер представляет собой регистр из n кубитов, управляемых внешними (классическими) сигналами. Квантовый компьютер встроен в классическое окружение, состоящее из управляющего классического компьютера и генераторов импульсов, управляющих эволюцией кубитов, а также средствами измерений состояния кубитов. В ходе вычислений к регистру n можно добавлять другие (вспомогательные) регистры.

Идеальным можно назвать квантовый компьютер, состояния которого всегда когерентны. Это означает, во-первых, отсутствие взаимодействия компьютера с окружением, создающим шумы и нарушающим когерентность вектора состояния компьютера (декогерентизация), во-вторых, в идеальном квантовом компьютере внешние сигналы осуществляют точное управление.

Удобно полагать, что в начальном состоянии компьютера все его кубиты находятся в состоянии $|0\rangle: |\psi_{in}\rangle = |0_1 \dots 0_n\rangle$. Эту операцию называют **инициализацией**. Состояние $|0_1 \dots 0_n\rangle$ можно получить охлаждением кубитов до сверхнизких температур или путем измерения и управления состоянием кубитов. Алгоритм решения задачи заключен в матрице преобразования $U(2n \times 2n)$. Классическая

информация о решении задачи содержится в конечном векторе состояния $|\psi_f\rangle$. Она должна быть получена измерением кубитов.

Как уже отмечалось, по способу управления квантовый компьютер является аналоговым компьютером. Такое сочетание свойств – аналоговый способ управления, вероятностный характер представления цифрового решения – не присутствует ни в одном типе классических компьютеров. Квантовый компьютер выглядит минотавром в мире компьютеров, сочетая несовместимые в классическом мире свойства аналоговых и цифровых классических компьютеров.

На заре развития вычислительной техники (1950-1960 гг.) аналоговые (классические) компьютеры успешно дополняли цифровые ЭВМ. Впоследствии они были вытеснены цифровыми ЭВМ из-за невысокой точности получаемых решений. Аналоговые переменные (токи, напряжения) удавалось контролировать с погрешностью 10^{-2} . По современным оценкам параметры управляющих кубитами сигналов (импульсов) должны контролироваться с погрешностью 10^{-5} – 10^{-4} . Такую дорогую плату должны будут заплатить создатели квантовых компьютеров за сюрприз встречи с минотавром - цифровым компьютером с аналоговым управлением. Как показано ниже, высокая точность операций необходима, чтобы справиться с проблемой декогерентизации квантовых состояний.

15.2.6. Классическая и квантовая информация в квантовой системе

Аналоговый характер квантовой информации имеет принципиальное значение для квантовой теории. Харди показал, что, приняв в системе аксиом теории вероятностей возможность непрерывного преобразования состояний друг в друга (вместо скачкообразного перехода в классической теории вероятностей), можно интерпретировать квантовую механику как квантовую теорию вероятностей.

Квантовая теория информации строится во многом по аналогии с теорией классической информации Шеннона, аналогично информационной энтропии Шеннона строится квантовая энтропия фон Неймана. Свойства энтропии фон Неймана отличаются от свойств энтропии Шеннона неполной различимостью неортогональных состояний, запутанными состояниями кополитных систем и др.

15.2.7. Смешанные и запутанные состояния квантовых систем

В экспериментах часто имеют дело с ансамблями квантовых систем, приготовленных определенным способом. С точки зрения описания состояния частиц в ансамбле приготовление систем можно осуществить двумя способами: 1) с получением полной информации о состоянии квантовой системы; 2) с получением только вероятностной информации о состоянии квантовой системы. Пример таких способов приготовления приведен на рис. 7.5.



Рис. 7.5. Схема приготовления атомов в чистом (а) и смешанном (б) состояниях

Печь создает поток атомов (кубитов) со спином $I=1/2$; состояния $|0\rangle$ (спин вверх) и $|1\rangle$ (спин вниз) встречаются в ансамбле атомов с вероятностями больцмановского распределения.

В первом способе приготовления ансамбль атомов проходит через сепаратор (прибор Штерна-Герлаха), который пространственно разделяет его на два потока, соответствующие состояниям $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Ансамбль атомов в состоянии $|1\rangle$ поглощается адсорбером; оставшийся ансамбль атомов находится в чистом состоянии $|0\rangle$. Таким образом, мы имеем полную информацию о состоянии атомов в ансамбле. Во втором способе сепаратор отсутствует; ансамбль атомов состоит из атомов в состояниях $|0\rangle$ и $|1\rangle$ с вероятностями $p_{|0\rangle}$ и $p_{|1\rangle}$. Такое состояние представляет собой смесь чистых состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$.

Математически смешанное состояние квантовой системы можно описать только матрицей плотности

$$\rho = p_{|0\rangle}|0\rangle\langle 0| + p_{|1\rangle}|1\rangle\langle 1|.$$

Здесь

$$|0\rangle\langle 0| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad |1\rangle\langle 1| = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- проекторы на состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Можно также сказать, что квантовая система в смешанном состоянии не обладает волновой функцией. Матрица плотности не содержит информацию о фазах состояний, составляющих смесь. Это означает, что смешанные состояния не являются квантово-когерентными; они не обнаруживают явлений квантовой интерференции. Смешанные состояния можно классифицировать как близкие к классическим состояниям, поскольку их описание матрицей плотности близко к статистическому описанию классических систем.

Процессы перехода от чистых квантовых состояний к смешанным многие авторы рассматривают как процессы классицизации квантово-когерентных систем. Однако состояния, составляющие смесь, являются квантово-когерентными: в частности они могут быть запутанными, и эта запутанность может быть извлечена из смешанного состояния (entanglement purification) и передана другой квантовой системе в чистом состоянии. Процесс перехода сис-

темы от квантово-когерентного чистого состояния, описываемого волновой функцией, к некогерентному состоянию, описываемому матрицей плотности, называется также процессом декогерентизации системы.

Запутанные состояния квантовых систем

Теория запутанных состояний композитных квантовых систем находится в состоянии разработки. В отношении систем, состоящих из двух частей (A и B) достигнуто более или менее полное понимание и описание запутанности. Положения теории двухчастичных систем не удается непосредственно распространить на системы, число частей которых больше двух. Для таких систем получен ряд частных результатов. Запутанность является сердцевинным свойством квантовых систем. Из существования запутанных систем вытекает нелокальность квантового описания природы. ***Запутанность служит важнейшим ресурсом в квантовой информатике***: использование запутанных состояний обеспечивает выполнение протоколов квантовой телепортации, криптографии и вычислений. Поэтому явление запутанности вызывает большое внимание исследователей. Удивительно, что в стандартных учебниках квантовой механики о запутанности в квантовых системах даже не упоминается, хотя запутанные состояния были обнаружены ещё в 1935 г. в знаменитых работах Шрёдингера и Эйнштейна с сотрудниками.

Измерение состояния кубита

Измерение состояния кубитов в квантовом компьютере является одной из стандартных операций. С теоретической точки зрения нет никаких сложностей в процедуре измерения состояния кубита в базисе $|0\rangle, |1\rangle$. Однако физическая реализация измерения кубита сопряжена с решением весьма сложных технологических проблем, связанных с преодолением трудностей измерения состояния отдельной атомной частицы: атома, иона, электрона, спина электрона или атомного ядра, фотона. По существу для каждой реализации кубита нужна разработка своего физического метода измерения его состояния. Можно утверждать, что проблема измерения состояния отдельных кубитов – одна из самых трудных с точки зрения физической реализации квантового компьютера.

15.2.8. Декогерентизация состояний квантовых систем

В теории идеального квантового компьютера считалось, что квантовые суперпозиции, описывающие состояния регистра из L кубитов, остаются когерентными в процессе вычислений сколь угодно долго. Однако взаимодействие регистра с неконтролируемым окружением, неточности в значениях параметров управляющих импульсов, а также неконтролируемое взаимодействие кубитов между собой является источником декогерентизации квантового состояния

$|\psi\rangle = \sum_x c_x |x\rangle$. Декогерентизация означает, что когерентное состояние системы превращается в смешанное, описываемое матрицей плотности $\rho = \sum_x |c_x|^2 |x\rangle\langle x|$.

В описании системы матрицей плотности нет информации о фазах базисных состояний, что лишает систему свойств интерферировать или запутываться. По сути декогерентизация состояний квантовой системы означает ее классицизацию, т.е. переход в состояние, описываемое законами классической физики.

Из оценок следует, что процессы декогерентизации квантовых состояний компьютера «запрещают» существование полномасштабного (способного решать большие задачи) квантового компьютера. Для выхода из положения необходимо сократить время операции и увеличить время декогерентизации кубита. Уменьшить время операции можно путем увеличения напряженности управляющих полей. Однако напряженности управляющих полей ограничены сверх возбуждением нерезонансных переходов и возникновением других нелинейных эффектов. Увеличение времени декогерентизации (времени пребывания системы в когерентном состоянии) требует тщательного изучения всех возможных механизмов декогерентизации кубита и изоляции кубита от окружения, увеличения точности управляющих сигналов и т.п.

Однако все эти меры могут оказаться недостаточными для обеспечения необходимого времени вычислений. Необходимы способы стабилизации когерентного состояния компьютера на сколь угодно длительное время, чтобы можно было завершить вычисления любой задачи с «большим» (но полиномиальным) алгоритмом вычислений. Таким методом является метод квантовой коррекции ошибок.

Метод предполагает периодическую «очистку» состояния квантового компьютера от малых ошибок, возникших в векторе состояния в результате процессов декогерентизации за время после последней очистки. Предложены также «активные» методы подавления процессов декогерентизации. Однако квантовый метод коррекции ошибок представляет собой главную надежду исследователей на возможность построения полномасштабного квантового компьютера, работающего в когерентном состоянии сколь угодно длительное время.

Декогерентизация играет важную роль в появлении у тел классических свойств. Приведем классификацию тел по числу частиц, размерам и времени декогерентизации состояний орбитального движения электронов.

Таблица 7.1. Масштаб системы и время декогерентизации

Масштаб системы	Число частиц	Объем, см ³	Время декогерентизации, с
Атомный	1	10 ⁻²³	10 ⁻⁹
Мезоскопический	10 ³	10 ⁻²⁰	10 ⁻¹²
Микроскопический	10 ¹²	10 ⁻¹²	10 ⁻²¹
Макроскопический	10 ²³	1	10 ⁻³²

Время существования когерентных состояний атомных и мезоскопических систем ($10^{-9} - 10^{-12}$ с) позволяет наблюдать квантовые когерентные состояния современными экспериментальными методами. Времена существования микро и макроскопических тел в квантово-когерентных состояниях ($10^{-21} - 10^{-32}$ с) таковы, что эти состояния не могут быть наблюдаемы в современных экспериментах.

15.2.9. Поиски путей реализации квантовых компьютеров

Перечислим направления поиска с краткими комментариями.

Метод ядерного магнитного резонанса в жидкостях при комнатной температуре дал возможность демонстрации экспериментального выполнения основных квантовых алгоритмов и методов коррекции ошибок с использованием до семи кубитов в ансамблевом квантовом компьютере. Однако после установления факта, что число кубитов в ЯМР - квантовом компьютере в жидкостях при комнатной температуре ограничено числом порядка 10, усилия по развитию этого направления, по-видимому, ослабли.

Вариант квантового компьютера на ионах в ловушке Пауля также имеет серьёзные препятствия к увеличению числа кубитов (ионов в одномерном кристалле) из-за их неустойчивости. Эти ограничения могут быть преодолены, если работать со многими ловушками, но необходимо разработать методы быстрой транспортировки ионов из одной ловушки в другую (за время сравнимое со временем квантовых операций). Принципиальная возможность такой транспортировки показана.

Сходная с ионными кристаллами архитектура расположения кубитов может быть реализована в полупроводниковых кристаллах бесспинового моноизотопного кремния ^{28}Si , в котором атомы фосфора ^{31}P (кубиты) расположены в линейной цепочке (модель Кейна). Кубитом служит ядерный ($I=1/2$) или электронный ($S=1/2$) спин атома фосфора ^{31}P . Число кубитов в такой архитектуре не ограничено. Темп развития этого перспективного направления определяется состоянием нанотехнологических разработок. Трудным здесь является измерение состояния одиночного спинового кубита. Проблема может быть, по-видимому, облегчена ансамблевым вариантом кубита, по Валиеву⁶⁴.

Рассмотрим строение ячейки предлагаемого двухкубитового квантового компьютера. На кремниевой подложке методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращивается буферный слой твердого раствора Si/Ge, на котором последовательно размещается еще пять рабочих слоев, состав и толщина которых определяются необходимой энергетической диаграммой (левая часть рисунка) и требованиями эффективного воздействия управляющих затворов. Основными слоями, в которых происходят квантовые вычисления, являются слои D_2 (второй донорный слой) и «настроечный» (tuning) слой T. В слое D_2 размещаются атомы ^{31}P на расстоянии 2000 \AA друг от друга. Связанные с этими атомами

⁶⁴ К.А. Валиев. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // Успехи физических наук, 2005, т. 175, №1, С. 3-39.

электроны и выполняют роль кубитов. Слои D_2 и T отличаются составом и поэтому имеют разный g -фактор: для слоя D он составляет 1,995, а для слоя T – 1,563. Слои D_2 и T заключены между двумя барьерными слоями V , которые ограничивают перемещение электрона в вертикальном направлении. Это ограничение определяется разрывом зоны проводимости между слоями D_2 и V и T и V , которые равны 20 мэВ. Ограничение барьером

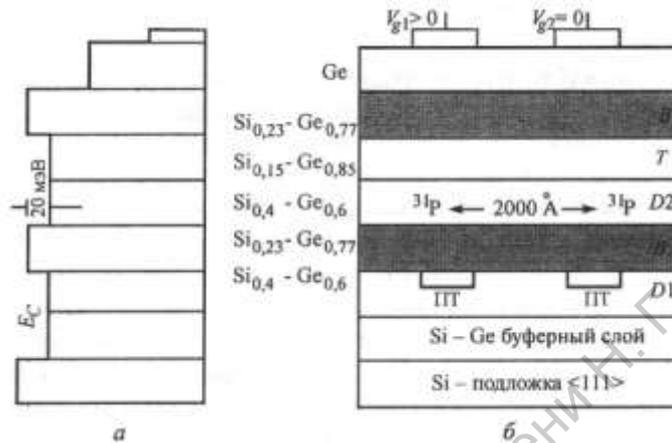


Рис. 7.6. Строение ячейки электронного спинового резонанса, состоящей из двух кубитов: а – энергетический профиль гетероструктуры $Ge_{1-x}Si_x$; и – поперечный разрез двухкубитовой ячейки

играет важную роль. Оно сохраняет кубитные донорные электроны в течение долгого времени, не допуская потерь как носителей, так и квантовой информации. Для этого толщина барьера составляет порядка 200 \AA , при этом время жизни сравнимо со временем спин-решеточной релаксации T_1 (около 1ч). Оба слоя толщиной 400 \AA согласуются с пределом, ограниченным напряжениями (1000 \AA для $x=0,23$). Слои D и T имеют толщину, сравнимую с вертикальным Боровским радиусом, и вносят слабый вклад в возникающие напряжения. Очень важно, что между слоями D_2 и T разрыв зон равен нулю, так что нет препятствий для перемещения электрона из слоя D_2 в слой T . В слое D_1 (первый донорный слой) перпендикулярно плоскости рисунка размещены каналы МДП-транзисторов, которые служат для регистрации сигнала в конце вычислений и пространственно расположены под атомами фосфора.

В настоящее время активно работают над созданием кубитов на электронах в квантовых точках. В качестве кубитовых исследуются орбитальные или спиновые состояния одиночного электрона в квантовой точке. В этом методе число кубитов (квантовых точек с одиночным электроном) также не ограничено.

Изготовлены и исследованы кубиты на сверхпроводниковых мезоструктурах. Здесь созданы два варианта кубитов: в первом варианте квантовая информация кодируется числом сверхпроводящих пар в квантовой точке, во втором – направлением сверхпроводящего тока в скивде. Для изготовления структур кубитов используется технологический арсенал микроэлектроники. Число

кубитов на чипе в принципе не ограничено. В данном направлении наблюдается большая активность экспериментаторов и постоянный прогресс.

Ведутся работы в направлении создания оптического квантового компьютера на основе линейных оптических элементов. Перечисленные направления опираются на развитые с иными целями технологии (технологии построения стандартов времени, микроэлектронные, квантово-оптические технологии).

Другие перспективные идеи:

1) двумерный электронный кристалл вблизи поверхности жидкого гелия (физика этих кристаллов хорошо изучена, в качестве кубитов могут служить спины одиночных электронов);

2) двумерная решетка атомов в оптической ловушке, образованной стоячей волной интерферирующих лазерных пучков;

3) анионы в двумерном электронном газе в полупроводниках в условиях дробного квантового эффекта Холла;

4) квантовые клеточные автоматы в ферромагнитных (и антиферромагнитных) структурах и кристаллах.

Мечта или реальность?

В настоящее время идет разработка фундаментальных проблем для выбора основного пути развития. Скорее всего, вначале придется пойти по нескольким путям и потом сделать выбор. Пока диапазон мнений в отношении перспектив достаточно широк. Высказываются и критические замечания. Вот основные.

1. Квантовый компьютер не нужен, т.к. под него нет задач. За все время найдены только два эффективных квантовых алгоритма (Шора и Гровера). Не стоит делать квантовый компьютер только ради взлома популярной криптосистемы RSA: ко времени его создания она сама перестанет существовать.

2. Квантовый компьютер – аналоговая машина трудная в реализации.

3. Природа не избрала квантовый метод вычислений – в мозгу нет квантовых операций.

16. Нейронные сети и нейрокompьютеры

16.1. Зачем нужны искусственные нейронные сети?

После двух десятилетий почти полного забвения интерес к искусственным нейронным сетям быстро вырос ко второй половине 1980-х. Специалисты из таких далеких областей, как техническое конструирование, философия, физиология и психология, заинтригованы возможностями, предоставляемыми этой технологией, и ищут приложения им внутри своих дисциплин. Это возрождение интереса было вызвано как теоретическими, так и прикладными достижениями. Неожиданно открылись возможности использования вычислений в сферах, до этого относящихся лишь к области человеческого интеллекта, возмож-

ности создания машин, способность которых учиться и запоминать удивительным образом напоминает мыслительные процессы человека, и наполнения новым значительным содержанием критикованного термина "искусственный интеллект".

16.2. Свойства нейронных сетей

Искусственные нейронные сети индуцированы биологией, так как они состоят из элементов, функциональные возможности которых аналогичны большинству элементарных функций биологического нейрона. Эти элементы затем организуются по способу, который может соответствовать (или не соответствовать) анатомии мозга. Несмотря на такое поверхностное сходство, искусственные нейронные сети демонстрируют удивительное число свойств присущих мозгу. Например, они обучаются на основе опыта, обобщают предыдущие прецеденты на новые случаи и извлекают существенные свойства из поступающей информации, содержащей лишние данные.

Несмотря на такое функциональное сходство, даже самый оптимистичный их защитник не предположит, что в скором будущем искусственные нейронные сети будут дублировать функции человеческого мозга. Реальный "интеллект", демонстрируемый самыми сложными нейронными сетями, находится ниже уровня интеллекта дождевого червя, и энтузиазм должен быть умерен в соответствии с современными реалиями. Однако равным образом было бы неверным игнорировать удивительное сходство в функционировании некоторых нейронных сетей с человеческим мозгом. Эти возможности, как бы они ни были ограничены сегодня, наводят на мысль, что глубокое проникновение в человеческий интеллект, а также множество революционных приложений, могут быть не за горами.

Обучение. Искусственные нейронные сети могут менять свое поведение в зависимости от внешней среды. Этот фактор в большей степени, чем любой другой, ответствен за тот интерес, который они вызывают. После подачи входных сигналов (возможно, вместе с требуемыми выходами) они самонастраиваются, чтобы обеспечивать требуемую реакцию. Было разработано множество обучающих алгоритмов, каждый со своими сильными и слабыми сторонами. Как будет указано позднее, все еще существуют проблемы относительно того, чему сеть может обучиться и как обучение должно проводиться.

Обобщение. Отклик сети после обучения может быть до некоторой степени нечувствителен к небольшим изменениям входных сигналов. Эта внутренне присущая способность видеть образ сквозь шум и искажения жизненно важна для распознавания образов в реальном мире. Она позволяет преодолеть требование строгой точности, предъявляемое обычным компьютером, и открывает путь к системе, которая может иметь дело с тем несовершенным миром, в котором мы живем. Важно отметить, что искусственная нейронная сеть делает обобщения автоматически благодаря своей структуре, а не с помощью использования "человеческого интеллекта" в форме специально написанных компьютерных программ.

Абстрагирование. Некоторые из искусственных нейронных сетей обладают способностью извлекать сущность из входных сигналов. Например, сеть может быть обучена на последовательность искаженных версий буквы "А". После соответствующего обучения предъявление такого искаженного примера приведет к тому, что сеть породит букву совершенной формы. В некотором смысле она научится порождать то, что никогда не видела.

Эта способность извлекать идеальное из несовершенных входов ставит интересные философские вопросы. Она напоминает *концепцию идеалов, выдвинутую Платоном в его "Республике"*. Во всяком случае, способность извлекать идеальные прототипы является у людей весьма ценным качеством.

Применимость. Искусственные нейронные сети не являются панацеей. Они, очевидно, не годятся для выполнения таких задач, как начисление заработной платы. Похоже, однако, что им будет отдаваться предпочтение в большом классе задач распознавания образов, с которыми плохо или вообще не справляются обычные компьютеры.

16.3. История нейрокомпьютеров

Людей всегда интересовало их собственное мышление. Это самовопрошание, думание мозга о себе самом является, возможно, отличительной чертой человека. Имеется множество размышлений о природе мышления, простирающихся от духовных до анатомических. Обсуждение этого вопроса, протекавшее в горячих спорах философов и теологов с физиологами и анатомами, принесло мало пользы, так как сам предмет весьма труден для изучения. Те, кто опирался на самоанализ и размышление, пришли к выводам, не отвечающим уровню строгости физических наук. Экспериментаторы же нашли, что мозг труден для наблюдения и ставит в тупик своей организацией. Короче говоря, мощные методы научного исследования, изменившие наш взгляд на физическую реальность, оказались бессильными в понимании самого человека.

Нейробиологи и нейроанатомы достигли значительного прогресса. Усердно изучая структуру и функции нервной системы человека, они многое поняли в "электропроводке" мозга, но мало узнали о его функционировании. В процессе накопления ими знаний выяснилось, что мозг имеет ошеломляющую сложность. Сотни миллиардов нейронов, каждый из которых соединен с сотнями или тысячами других, образуют систему, далеко превосходящую наши самые смелые мечты о суперкомпьютерах. Тем не менее, мозг постепенно выдает свои секреты в процессе одного из самых напряженных и честолюбивых исследований в истории человечества.

Лучшее понимание функционирования нейрона и картины его связей позволило исследователям создать математические модели для проверки своих теорий.

Эксперименты теперь могут проводиться на цифровых компьютерах без привлечения человека или животных, что решает многие практические и морально-этические проблемы. В первых же работах выяснилось, что эти модели не только повторяют функции мозга, но и способны выполнять функции,

имеющие свою собственную ценность. Поэтому возникли и остаются в настоящее время две взаимно обогащающие друг друга цели нейронного моделирования: первая *понять функционирование нервной системы человека на уровне физиологии и психологии* и вторая - *создать вычислительные системы (искусственные нейронные сети), выполняющие функции, сходные с функциями мозга*. Именно эта последняя цель и находится в центре внимания этой главы.

Параллельно с прогрессом в нейроанатомии и нейрофизиологии психологами были созданы модели человеческого обучения. Одной из таких моделей, оказавшейся наиболее плодотворной, была модель Д. Хэбба, который в 1949г предложил закон обучения, явившийся стартовой точкой для алгоритмов обучения искусственных нейронных сетей. Дополненный сегодня множеством других методов он продемонстрировал ученым того времени, как сеть нейронов может обучаться.

В пятидесятые и шестидесятые годы группа исследователей, объединив эти биологические и физиологические подходы, создала первые искусственные нейронные сети. Выполненные первоначально как электронные сети, они были позднее перенесены в более гибкую среду компьютерного моделирования, сохранившуюся и в настоящее время. Первые успехи вызвали взрыв активности и оптимизма. Минский, Розенблатт, Уидроу и другие разработали сети, состоящие из одного слоя искусственных нейронов. Часто называемые персептронами, они были использованы для такого широкого класса задач, как предсказание погоды, анализ электрокардиограмм и искусственное зрение. В течение некоторого времени казалось, что ключ к интеллекту найден и воспроизведение человеческого мозга является лишь вопросом конструирования достаточно большой сети.

Но эта иллюзия скоро рассеялась. Сети не могли решать задачи, внешне весьма сходные с теми, которые они успешно решали. С этих необъяснимых неудач начался период интенсивного анализа. Минский, используя точные математические методы, строго доказал ряд теорем, относящихся к функционированию сетей.

Его исследования привели к написанию книги [4], в которой он вместе с Пайпертом доказал, что используемые в то время однослойные сети теоретически неспособны решить многие простые задачи, в том числе реализовать функцию "Исключающее ИЛИ". Минский не был оптимистичен относительно потенциально возможного здесь прогресса:

Персептрон показал себя заслуживающим изучения, несмотря на жесткие ограничения (и даже благодаря им). У него много привлекательных свойств: линейность, занимательная теорема об обучении, простота модели параллельных вычислений. Нет оснований полагать, что эти достоинства сохранятся при переходе к многослойным системам.

Блеск и строгость аргументации Минского, а также его престиж породили огромное доверие к книге - ее выводы были неуязвимы. Разочарованные исследователи оставили поле исследований ради более обещающих областей, а

правительства перераспределили свои субсидии, и искусственные нейронные сети были забыты почти на два десятилетия.

Тем не менее, несколько наиболее настойчивых ученых, таких как Кохонен, Гроссберг, Андерсон продолжили исследования. Наряду с плохим финансированием ряд исследователей испытывал затруднения с публикациями. Поэтому исследования, опубликованные в семидесятые и начале восьмидесятых годов, разбросаны в массе различных журналов, некоторые из которых малоизвестны. Постепенно появился теоретический фундамент, на основе которого сегодня конструируются наиболее мощные многослойные сети. Оценка Минского оказалась излишне пессимистичной, многие из поставленных в его книге задач решаются сейчас сетями с помощью стандартных процедур.

За последние несколько лет теория стала применяться в прикладных областях и появились новые корпорации, занимающиеся коммерческим использованием этой технологии. Нарастание научной активности носило взрывной характер. В 1987 г. было проведено четыре крупных совещания по искусственным нейронным сетям и опубликовано свыше 500 научных сообщений - феноменальная скорость роста.

Урок, который можно извлечь из этой истории, выражается *законом Кларка*, выдвинутым писателем и ученым Артуром Кларком. В нем утверждается, что, если крупный уважаемый ученый говорит, что нечто может быть выполнено, то он (или она) почти всегда прав. Если же ученый говорит, что это не может быть выполнено, то он (или она) почти всегда не прав. История науки является летописью ошибок и частичных истин. То, что сегодня не подвергается сомнениям, завтра отвергается. Некритическое восприятие "фактов" независимо от их источника может парализовать научный поиск. С одной стороны, блестящая научная работа Минского задержала развитие искусственных нейронных сетей.

Нет сомнений, однако, в том, что область пострадала вследствие необоснованного оптимизма и отсутствия достаточной теоретической базы. И возможно, что шок, вызванный книгой "Перцептроны", обеспечил необходимый период для созревания этой научной области.

16.4. Нейронные сети в последние годы

Имеется много впечатляющих демонстраций возможностей искусственных нейронных сетей: сеть научили превращать текст в фонетическое представление, которое затем с помощью уже иных методов превращалось в речь; другая сеть может распознавать рукописные буквы; сконструирована система сжатия изображений, основанная на нейронной сети. Все они используют сеть обратного распространения - наиболее успешный, по-видимому, из современных алгоритмов. Обратное распространение, независимо предложенное в трех различных работах, является систематическим методом для обучения многослойных сетей, и тем самым преодолевает ограничения, указанные Минским.

Проблемы однако остаются. Прежде всего, нет гарантии, что сеть может быть обучена за конечное время. Много усилий, израсходованных на обучение,

пропадает напрасно после затрат большого количества машинного времени. Когда это происходит, попытка обучения повторяется - без всякой уверенности, что результат окажется лучше. Нет также уверенности, что сеть обучится наилучшим возможным образом. Алгоритм обучения может попасть в "ловушку" так называемого локального минимума, и будет получено худшее решение.

Разработано много других сетевых алгоритмов обучения, имеющих свои специфические преимущества. Следует подчеркнуть, что ни одна из сегодняшних сетей не является панацеей, все они страдают от ограничений в своих возможностях обучаться и вспоминать.

Мы имеем дело с областью, продемонстрировавшей свою работоспособность, имеющей уникальные потенциальные возможности, много ограничений и множество открытых вопросов. Такая ситуация настраивает на умеренный оптимизм. Авторы склонны публиковать свои успехи, но не неудачи, создавая тем самым впечатление, которое может оказаться нереалистичным. Те, кто ищет капитал, чтобы рискнуть и основать новые фирмы, должны представить убедительный проект последующего осуществления и прибыли. Существует, следовательно, опасность, что искусственные нейронные сети начнут продавать раньше, чем придет их время, обещая функциональные возможности, которых пока невозможно достигнуть. Если это произойдет, то область в целом может пострадать от потери кредита доверия и вернуться к застою на период десятилетиями.

Для улучшения существующих сетей требуется много основательной работы.

Должны быть развиты новые технологии, улучшены существующие методы и расширены теоретические основы, прежде чем данная область сможет полностью реализовать свои потенциальные возможности.

Перспективы на будущее. Искусственные нейронные сети предложены для задач, простирающихся от управления боем до присмотра за ребенком. Потенциальными приложениями являются те, где человеческий интеллект малоэффективен, а обычные вычисления трудоемки или неадекватны. Этот класс приложений во всяком случае не меньше класса, обслуживаемого обычными вычислениями, и можно предполагать, что искусственные нейронные сети займут свое место наряду с обычными вычислениями в качестве дополнения такого же объема и важности.

16.5. Нейронные сети и экспертные системы

В последние годы над искусственными нейронными сетями доминировали логические и символично-операционные дисциплины. Например, широко пропагандировались экспертные системы, у которых имеется много заметных успехов, так же, как и неудач. Кое-кто говорит, что искусственные нейронные сети заменят собой современный искусственный интеллект, но многое свидетельствует о том, что они будут существовать, объединяясь в системах, где каждый подход используется для решения тех задач, с которыми он лучше справляется.

Эта точка зрения подкрепляется тем, как люди функционируют в нашем мире. Распознавание образов отвечает за активность, требующую быстрой реакции. Так как действия совершаются быстро и бессознательно, то этот способ функционирования важен для выживания во враждебном окружении. Вообразите только, что было бы, если бы наши предки вынуждены были обдумывать свою реакцию на прыгнувшего хищника?

Когда наша система распознавания образов не в состоянии дать адекватную интерпретацию, вопрос передается в высшие отделы мозга. Они могут запросить добавочную информацию и займут больше времени, но качество полученных в результате решений может быть выше.

Можно представить себе искусственную систему, подражающую такому разделению труда. Искусственная нейронная сеть реагировала бы в большинстве случаев подходящим образом на внешнюю среду. Так как такие сети способны указывать доверительный уровень каждого решения, то сеть "знает, что она не знает" и передает данный случай для разрешения экспертной системе. Решения, принимаемые на этом более высоком уровне, были бы конкретными и логичными, но они могут нуждаться в сборе дополнительных фактов для получения окончательного заключения. Комбинация двух систем была бы более мощной, чем каждая из систем в отдельности, следуя при этом высокоэффективной модели, даваемой биологической эволюцией.

Соображения надежности. Прежде чем искусственные нейронные сети можно будет использовать там, где поставлены на карту человеческая жизнь или ценное имущество, должны быть решены вопросы, относящиеся к их надежности.

Подобно людям, структуру мозга которых они копируют, искусственные нейронные сети сохраняют в определенной мере непредсказуемость. Единственный способ точно знать выход состоит в испытании всех возможных входных сигналов. В большой сети такая полная проверка практически неосуществима и должны использоваться статистические методы для оценки функционирования. В некоторых случаях это недопустимо. Например, что является допустимым уровнем ошибок для сети, управляющей системой космической обороны? Большинство людей скажет, любая ошибка недопустима, так как ведет к огромному числу жертв и разрушений. Это отношение не меняется от того обстоятельства, что человек в подобной ситуации также может допускать ошибки.

Проблема возникает из-за допущения полной безошибочности компьютеров. Так как искусственные нейронные сети иногда будут совершать ошибки даже при правильном функционировании, то, как ощущается многими, это ведет к ненадежности - качеству, которое мы считаем недопустимым для наших машин.

Сходная трудность заключается в неспособности традиционных искусственных нейронных сетей "объяснить", как они решают задачу. Внутреннее представление, получающееся в результате обучения, часто настолько сложно, что его невозможно проанализировать, за исключением самых простых случаев. Это напоминает нашу неспособность объяснить, как мы узнаем человека,

несмотря на различие в расстоянии, угле, освещении и на прошедшие годы. Экспертная система может проследить процесс своих рассуждений в обратном порядке, так что человек может проверить ее на разумность. Сообщалось о встраивании этой способности в искусственные нейронные сети, что может существенно повлиять на приемлемость этих систем.

Выводы к главе 16

Искусственные нейронные сети являются важным расширением понятия вычисления. Они обещают создание автоматов, выполняющих функции, бывшие ранее исключительной прерогативой человека. Машины могут выполнять скучные, монотонные и опасные задания, и с развитием технологии возникнут совершенно новые приложения.

Теория искусственных нейронных сетей развивается стремительно, но в настоящее время она недостаточна, чтобы быть опорой для наиболее оптимистических проектов. В ретроспективе видно, что теория развивалась быстрее, чем предсказывали пессимисты, но медленнее, чем надеялись оптимисты, - типичная ситуация. Сегодняшний взрыв интереса привлек к нейронным сетям тысячи исследователей. Резонно ожидать быстрого роста нашего понимания искусственных нейронных сетей, ведущего к более совершенным сетевым парадигмам и множеству прикладных возможностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физика как образец «продвинутой» науки содержит в себе классический и неклассический компоненты. Философией более или менее освоена классическая часть физики и делаются попытки овладения неклассической частью, главным образом на уровне систематизации. Указанное состояние затрудняет изложение неклассической части физики «на пальцах». Поэтому физика часто идет по пути математизации, хотя эта тенденция имеет свои корни в классической части. Однако путь математизации позволяет легче ответить на вопрос, как протекает то или иное физическое явление, а не почему оно происходит. Кроме того, математика не обращается к простым и наглядным физическим образам, что затрудняет изобретательскую деятельность в науке, особенно на уровне новых физических явлений. Потребность в наглядности и вообще физическом моделировании сохраняется в физической (как и почти в любой другой) науке.

В связи с возникающими трудностями возникает вопрос, чем же мы как субъекты познания располагаем для своей познавательной деятельности. Очевидно, что одних органов чувств мало – нужен еще и аналитический аппарат, что тоже достаточно известно. Но это еще не все компоненты психики, которая и представляет собой главное богатство познающего субъекта. Активную роль в процессе познания играют структуры коллективного бессознательного, без которых невозможна творческая деятельность.

Культурно обусловленные архетипы коллективного бессознательного создают ту измерительно-оценочную сетку, которую познающий субъект накладывает на изучаемый мир с тенденцией навязать ему эти структуры. Поскольку, однако, наука претендует на объективность рассмотрения, эта самая объективность достигается как конвенциональность - соглашение сообщества специалистов. Согласие с действительностью достигается тем лучше, чем полнее удастся избежать произвола в оценке. Впрочем, произвол больше грозит общественным наукам, чем физике, в который критерием истины (адекватности модели) выступает по большому счету эксперимент.

В механике мы таким образом освобождаемся от субъективизма, произвола, поскольку роль наблюдателя там относительно невелика, а изучаемые процессы имеют наглядность, поскольку размеры системы сопоставимы с размерами человеческого тела и органов чувств. Поэтому в механике легче прослеживается последовательность событий во времени и, через это, причинно-следственная связь. Но и в механике появляется практическое отклонение от наблюдаемой причинности (детерминизма), что проиллюстрировано на примере бильярдных шаров. Кроме того, в рамках механики существует поле тяготения, происхождение которого неясно и для тяготения нет иной модели, за исключением математической.

Еще меньшую наглядность демонстрирует электромагнитное поле. Вопрос о том, что колеблется в электромагнитных колебаниях остается без ответа: просто постулируется колеблющаяся субстанция как самостоятельный вид материи.

И механические, и электромагнитные процессы имеют место в евклидовом пространстве, в котором свет распространяется по прямой, а сила воздействия обратно пропорциональна квадрату расстояния. Но вблизи больших масс и на очень малых расстояниях взаимодействие перестает быть евклидовым, а свет распространяется по прямой. И закон обратных квадратов тоже нарушается. На уровне атомного ядра имеют место сильные и слабые взаимодействия с более сильной зависимостью от расстояния, чем это наблюдается в евклидовом пространстве. Самоподобие (скейлинг) материи здесь нарушается в связи с переходом от классических к квантовым закономерностям. Нарушается ли в микромире (мире квантовых явлений) формальная логика, которая важна для познающего субъекта? На первых порах кажется, что да: нужны сумасшедшие (не подчиняющиеся логике) явления, к выдвигению которых призывал Нильс Бор на заре квантовой механики. Но по мере выстраивания связей с остальным миром права формальной логики постепенно восстанавливаются, что делает возможным исследование квантовых явлений с помощью человеческого разума. Познаваемость мира физика сомнению не подвергает. Это вообще один из (скрытых) постулатов научного исследования.

Правда, возникает вопрос, можно ли с помощью физики объяснить сам разум. На этот вопрос физика дает отрицательный ответ. Не объясняет физика и феномен (органической) жизни. Физики думают, что это временное явление. Но если в будущем такое постижение произойдет, то познающий человеческий разум окажется слабее познаваемой естественной и искусственной природы. Го-

товится ли наука к выходу из этого положения? Вероятно, да, если иметь в виду технические науки и в первую очередь те, которые занимаются искусственным интеллектом. Возможности технического интеллекта по отдельным параметрам уже превосходят человеческий разум. И пока не наступил предел совершенству этих систем. Современная техника – это автоматизированные, компьютеризированные системы. Это царство системного подхода, который опирается уже не на одну науку, какой бы продвинутой она ни была. Гуманитарные науки (языкознание) тоже идут в дело. Научное знание снова (спустя тысячелетия) становится комплексным. Венцом возможного уже не является только «господняя квантовая механика» (выражение Э. Шредингера), хотя и её резервы ещё не до конца использованы.

Познавательные трудности непрерывно порождают «альтернативную» науку, псевдонауку. Отдельные колеблющиеся ученые стремятся в лоно церкви, хотя бог для учёного – чаще всего непознанные закономерности, (ещё) не охваченные причинно-следственной связью, что обычно неприемлемо для церкви. Этот процесс стар как мир. Однако обращение к богу не укрепляет процесс познания. Да и само христианство не поощряет употребление имени Господнего всуе.

Стремление к прогрессу, надо думать, необратимо, но требует постоянного анализа пройденного пути, чтобы не загубить мощной техникой саму жизнь. Автор надеется, что рассмотренный материал на это и направлен.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П.1. Тексты по астрофизике и космологии

В приложении даны в алфавитном порядке некоторые понятия и пояснения к ним, связанные с разделом 5 пособия (Физика мегамира).

П.1.1. Нейтронная звезда⁶⁵

Звезда, в основном состоящая из нейтронов. Нейтрон – это нейтральная субатомная частица, одна из главных составляющих вещества. Гипотезу о существовании нейтронных звезд выдвинули астрономы В. Бааде и Ф. Цвикки сразу после открытия нейтрона в 1932. Но подтвердить эту гипотезу наблюдениями удалось лишь после открытия пульсаров в 1967.

Нейтронные звезды образуются в результате гравитационного коллапса нормальных звезд с массами в несколько раз больше солнечной. Плотность нейтронной звезды близка к плотности атомного ядра, т.е. в 100 млн. раз выше плотности обычного вещества. Поэтому при своей огромной массе нейтронная звезда имеет радиус всего около 10 км.

Из-за малого радиуса нейтронной звезды сила тяжести на ее поверхности чрезвычайно велика: примерно в 100 млрд. раз выше, чем на Земле. От коллапса эту звезду удерживает «давление вырождения» плотного нейтронного вещества, не зависящее от его температуры.

⁶⁵ ЛИТЕРАТУРА

Дайсон Ф., Тер Хаар Д. *Нейтронные звезды и пульсары*. М., 1973
Липунов В.М. *Астрофизика нейтронных звезд*. М., 1987

Однако если масса нейтронной звезды станет выше примерно 2 солнечных, то сила тяжести превысит это давление и звезда не сможет противостоять коллапсу.

У нейтронных звезд очень сильное магнитное поле, достигающее на поверхности 10^{12} – 10^{13} Гс (для сравнения: у Земли около 1 Гс). С нейтронными звездами связывают небесные объекты двух разных типов.

Пульсары (радиопульсары). Эти объекты строго регулярно излучают импульсы радиоволн. Механизм излучения до конца не ясен, но считают, что вращающаяся нейтронная звезда излучает радиолуч в направлении, связанном с ее магнитным полем, ось симметрии которого не совпадает с осью вращения звезды. Поэтому вращение вызывает поворот радиолуча, периодически направляющегося на Землю.

Рентгеновские двойные. С нейтронными звездами, входящими в двойную систему с массивной нормальной звездой, связаны также пульсирующие рентгеновские источники. В таких системах газ с поверхности нормальной звезды падает на нейтронную звезду, разгоняясь до огромной скорости. При ударе о поверхность нейтронной звезды газ выделяет 10–30% своей энергии покоя, тогда как при ядерных реакциях этот показатель не достигает и 1%. Нагретая до высокой температуры поверхность нейтронной звезды становится источником рентгеновского излучения. Однако падение газа не происходит равномерно по всей поверхности: сильное магнитное поле нейтронной звезды захватывает падающий ионизованный газ и направляет его к магнитным полюсам, куда он и падает, как в воронку. Поэтому сильно нагреваются только районы полюсов, которые на вращающейся звезде становятся источниками рентгеновских импульсов. Радиопульсары от такой звезды уже не поступают, поскольку радиоволны поглощаются в окружающем ее газе.

Состав. Плотность нейтронной звезды растет с глубиной. Под слоем атмосферы толщиной всего несколько сантиметров находится жидкая металлическая оболочка толщиной несколько метров, а ниже – твердая кора километровой толщины. Вещество коры напоминает обычный металл, но гораздо плотнее. В наружной части коры это в основном железо; с глубиной в его составе увеличивается доля нейтронов. Там, где плотность достигает около $4 \cdot 10^{11}$ г/см³, доля нейтронов увеличивается настолько, что некоторые из них уже не входят в состав ядер, а образуют сплошную среду. Там вещество похоже на «море» из нейтронов и электронов, в которое вкраплены ядра атомов. А при плотности около $2 \cdot 10^{14}$ г/см³ (плотность атомного ядра) вообще исчезают отдельные ядра и остается сплошная нейтронная «жидкость» с примесью протонов и электронов. Вероятно, нейтроны и протоны ведут себя при этом как сверхтекучая жидкость, подобная жидкому гелию и сверхпроводящим металлам в земных лабораториях.

При еще более высоких плотностях в нейтронной звезде образуются наиболее необычные формы вещества. Может быть, нейтроны и протоны распадаются на еще более мелкие частицы – кварки; возможно также, что рождается много пи-мезонов, которые образуют так называемый пионный конденсат.

П.1.2. Новая звезда⁶⁶

Переменная звезда, демонстрирующая вспышку или очень быстрое усиление блеска, за которым следует его медленное ослабление вплоть до полного угасания. Новые звезды относятся к большому классу звезд, называемых катаклизмическими переменными. Древние астрономы использовали термин «новые» для обозначения небесных объектов, которые до вспышки не были видны невооруженным глазом. Все вспыхнувшие звезды, как «новые», так и «сверхновые», они называли «новыми звездами» (*nova stella* – лат.). Во время вспышки сверхновой вся термоядерная энергия звезды внезапно высвобождается. Звезда, испытавшая взрыв как сверхновая, полностью меняется: от нее остается либо черная дыра, либо нейтрон-

⁶⁶ ЛИТЕРАТУРА

Горбачкий В.Г. *Новоподобные и новые звезды*. М., 1974

ная звезда, либо вообще ничего. В последнем случае звезда буквально разлетается и прекращает существование.

Вспышка. Вспышка новой – одно из наиболее драматических событий в астрономии. Новая, вспыхнувшая в 1975 в созвездии Лебеда, почти достигла яркости Денеба (ярчайшей звезды в Лебеде) и сохраняла такую яркость около трех суток. Хотя блеск большинства новых усиливается примерно в миллион раз, блеск этого необычного объекта усилился в 100 млн. раз. Новые достигают максимального блеска за несколько часов и находятся в стадии максимума различное время. «Быстрые» новые сохраняют максимальный блеск от нескольких часов до 1–2 суток, а затем быстро ослабевают. «Медленные» новые не так быстро усиливают свой блеск, дольше находятся в максимуме и гораздо медленнее гаснут. Например, Новая Геркулеса 1934 находилась в максимуме блеска почти три месяца, затем быстро ослабела в течение месяца, после чего немного усилила свой блеск и продолжила медленное ослабление в течение нескольких лет. Другая очень медленная новая вспыхнула в Дельфине в 1967 и находилась в стадии максимального блеска почти год. Быстрое ослабление и последующее небольшое усиление блеска Новой Геркулеса 1934 и других подобных новых говорит об образовании малых твердых частичек в веществе, выброшенном звездой при взрыве. Эти частички конденсируются в микроскопические углеродные зернышки, поглощающие свет.

Эволюция спектра новой звезды во время вспышки сложна и интересна. Спектры, полученные в период усиления блеска, показывают, что расширяющиеся слои газа сохраняют высокую температуру (40 000–50 000 К). В момент достижения максимума блеска температура газа падает до 10 000 К, а спектр лишь немного отличается от спектров обычных звезд. У быстрых новых линии поглощения углерода, азота и кислорода довольно сильные и вначале смещены только в коротковолновую область. Из этого следует, что наблюдаемое вещество движется в направлении Земли со скоростью несколько сотен и тысяч километров в секунду. Сразу после максимума блеска расширяющееся облако газа становится прозрачным, позволяя астрономам видеть не только приближающиеся, но и удаляющиеся его части: облако расширяется во все стороны от центрального объекта. В спектре появляются широкие и яркие эмиссионные линии водорода и других элементов. Анализ спектров показывает, что примерно 0,001% массы звезды (что составляет от 10 до 100 масс Земли) выбрасывается в пространство и что состав вещества сильно отличается от того, который наблюдается в атмосфере Солнца. По отношению к содержанию водорода отмечается очень много гелия, а также углерода, азота, кислорода и иногда неона. Существует корреляция между скоростью вспышки и степенью избытка этих элементов: быстрые новые выбрасывают больше углерода, азота и кислорода, чем медленные. Через несколько лет на месте вспышки новой можно наблюдать расширяющееся облако. Полная энергия такой вспышки (т.е. энергия излучения плюс кинетическая энергия выброшенной оболочки), равна энергии термоядерного синтеза гелия из водорода с массой, равной массе Земли.

Системы новых. Наблюдения при помощи больших телескопов показали, что катаклизмические переменные состоят из двух звезд – главной звезды и спутника, обращающихся вокруг общего центра масс под действием взаимного притяжения. Обычно спутником служит звезда размером с Солнце. Главной звездой является маленький и горячий белый карлик: его масса близка к солнечной, а радиус примерно равен земному. Это означает, что его плотность очень велика – в несколько миллионов раз выше плотности воды (наперсток такого вещества весит более тонны). Белые карлики являются последней стадией эволюции звезд типа Солнца. Наличие белого карлика в двойной системе указывает на ее большой возраст (один из компонентов системы имел достаточно времени, чтобы дойти до конца своей эволюции).

Эволюция звезд типа Солнца начинается с медленного превращения водорода в гелий в ядре звезды. Примерно через 10 млрд. лет, когда ядро становится полностью гелиевым, внешние слои звезды расширяются, и она превращается в красный гигант (Солнце на этой стадии эволюции увеличится так, что выйдет за пределы орбиты Земли). В ходе дальнейшей

эволюции гелий превращается в углерод, кислород и, возможно, неон. Ядро звезды становится все более плотным, а внешние слои расширяются все больше, пока не рассеются в пространстве. В этот момент вокруг звезды образуется газовая оболочка, расширяющаяся в пространство и называемая «планетарной туманностью». В ядре звезды, ставшем белым карликом, термоядерные реакции больше не происходят.

Подобный ход эволюции должна была бы пройти и главная звезда в системе катаклизмической переменной. Но, поскольку она обращается вокруг другой звезды, ее размер не может превысить расстояния до звезды-спутника. Когда внешние слои главной звезды расширяются, спутник попадает в них, тормозится, и две звезды начинают медленно по спирали сближаться. Это продолжается до тех пор, пока главная звезда не сбросит оболочку и не станет белым карликом. Астрономам удалось обнаружить короткопериодические затменные двойные звезды, окруженные такими расширяющимися облаками газа.

В конце этой стадии эволюции спутник еще не изменяется, а главная звезда, сбросив оболочку, медленно остывает. Она состоит из углеродно-кислородного ядра, окруженного тонким слоем гелия. Продолжая эволюционировать, спутник в конце концов тоже достигает стадии расширения. Его внешние слои распухают до такой степени, что белый карлик начинает сдирать со спутника оболочку и притягивать ее к себе. Оседающий на его поверхность газ образует все более толстый слой, основание которого сжимается и нагревается, пока не достигнет температуры термоядерного возгорания. Поскольку падающее со спутника вещество в основном содержит водород, оболочка белого карлика становится готова к взрыву.

Причина вспышки. После многих лет аккреции нижняя часть водородного слоя становится не только горячей и плотной, но и «вырожденной»; этот термин означает, что атомы и электроны в газе так сжаты, что ведут себя как в металле. Такой газ при нагревании не расширяется. Когда начинаются термоядерные реакции, газ быстро нагревается, и скорость реакций от этого возрастает – происходит взрыв.

Скорость и мощность взрыва зависят от химического состава оболочки. Если в ней преобладают водород и гелий, то взрыв происходит медленно. Но если в оболочке много углерода и кислорода, то реакция синтеза с участием водорода, углерода, азота и кислорода идет быстрее: углерод играет в ней роль катализатора. Чем больше углерода, тем интенсивнее и мощнее взрыв. Это теоретическое предсказание, сделанное в начале 1970-х годов, подтвердилось наблюдениями химического состава оболочек, сброшенных медленными и быстрыми новыми звездами.

Карликовые новые. При вспышке карликовой новой ее светимость за несколько часов возрастает примерно в 100 раз и сохраняется в этом состоянии несколько суток. Причиной такой относительно слабой вспышки считается не термоядерный взрыв, а нерегулярность аккреции вещества нормальной звезды на белый карлик. Возможно, звезда теряет вещество порциями, а может быть, газ накапливается в аккреционном диске, а затем порциями попадает на поверхность белого карлика. Изучение таких вспышек позволяет понять детали процесса аккреции вещества.

П.1.3. Пульсар⁶⁷

Астрономический объект, испускающий мощные, строго периодические импульсы электромагнитного излучения в основном в радиодиапазоне. Энергия, излучаемая в импульсах, составляет лишь малую долю его полной энергии. Почти все известные пульсары находятся в нашей Галактике. У каждого пульсара свой период пульсаций; они лежат в диапазоне от 640 импульсов в секунду до одного импульса каждые 5 с. Периоды большинства пульсаров составляют от 0,5 до 1 с. Точные измерения показывают, что обычно период между им-

⁶⁷ ЛИТЕРАТУРА

Дайсон Ф., Тер Хаар Д. *Нейтронные звезды и пульсары*. М., 1973
Смит Ф. Г. *Пульсары*. М., 1979

пульсами возрастает на одну миллиардную долю секунды в сутки; как раз этого следует ожидать при замедлении вращения звезды, теряющей энергию в процессе излучения.

Открытие пульсаров в 1967 было большой неожиданностью, поскольку такие явления не предсказывались ранее. Вскоре стало ясно, что это явление связано либо с радиальными пульсациями, либо с вращением звезд. Но ни обычные звезды, ни даже белые карлики не могут естественным образом пульсировать с такой высокой частотой. Не могут они и вращаться так быстро – центробежная сила разорвет их. Это может быть только очень плотное тело, состоящее из вещества, предсказанного Л.Д. Ландау и Р. Оппенгеймером в 1939. В этом веществе ядра атомов вплотную прижаты друг к другу. Сжать вещество до такой степени может только гигантская сила тяжести, которой обладают лишь очень массивные тела, такие, как звезды. При огромной плотности ядерные реакции превращают большинство частиц в нейтроны, поэтому такие тела называют нейтронными звездами.

Обычные звезды, такие, как Солнце, состоят из газа со средней плотностью чуть больше, чем у воды. Белый карлик с такой же массой, но диаметром около 10 000 км имеет в центре плотность около 40 т/см^3 . У нейтронной звезды масса тоже близка к солнечной, но ее диаметр всего около 30 км и плотность около 200 млн. т/см^3 . Если бы до такой плотности сжать Землю, то ее диаметр составил бы около 300 м; при такой плотности все человечество уместилось бы в наперстке. По-видимому, нейтронная звезда может образоваться из центральной части массивной звезды в момент ее взрыва как сверхновой. При таком взрыве оболочка массивной звезды сбрасывается, а ядро сжимается в нейтронную звезду.

Наиболее детально исследован мощный пульсар PSR 0531 + 21, расположенный в Крабовидной туманности. Эта нейтронная звезда делает 30 оборотов в секунду и ее вращающееся магнитное поле с индукцией 10^{12} Гс «работает» как гигантский ускоритель заряженных частиц, сообщая им энергию до 10^{20} эВ, что в 100 млн. раз больше, чем в самом мощном ускорителе на Земле. Полная мощность излучения этого пульсара в 100 000 раз выше, чем у Солнца. Менее 0,01% этой мощности приходится на радиоимпульсы, около 1% излучается в виде оптических импульсов и около 10% – в виде рентгеновского излучения. Оставшаяся мощность, вероятно, приходится на низкочастотное радиоизлучение и высокоэнергичные элементарные частицы – космические лучи.

Длительность радиоимпульса у типичного пульсара составляет всего 3% интервала времени между импульсами. Последовательно приходящие импульсы сильно отличаются друг от друга, но средняя (обобщенная) форма импульса у каждого пульсара своя и сохраняется в течение многих лет. Анализ формы импульсов показал много интересного. Обычно каждый импульс состоит из нескольких субимпульсов, которые «дрейфуют» вдоль среднего профиля импульса. У некоторых пульсаров форма среднего профиля может внезапно меняться, переходя от одной устойчивой формы к другой; каждая из них сохраняется в течение многих сотен импульсов. Иногда мощность импульсов падает, а затем восстанавливается. Такое «замирание» может длиться от нескольких секунд до нескольких суток.

При подробном анализе у субимпульсов обнаруживается тонкая структура: каждый импульс состоит из сотен микроимпульсов. Область излучения такого микроимпульса на поверхности пульсара имеет размер менее 300 м. При этом мощность излучения сравнима с солнечной.

Механизм действия пульсара. Пока существует лишь приближенная картина действия пульсара. Его основой служит вращающаяся нейтронная звезда с мощным магнитным полем. Вращающееся магнитное поле захватывает вылетающие с поверхности звезды ядерные частицы и ускоряет их до очень высоких энергий. Эти частицы испускают электромагнитные кванты в направлении своего движения, формируя вращающиеся пучки излучения. Когда пучок оказывается направленным на Землю, мы принимаем импульс излучения. Не совсем ясно, почему эти импульсы имеют столь четкую структуру; возможно, лишь небольшие области поверхности нейтронной звезды выбрасывают частицы в магнитное поле. Частицы максимальной высокой энергии не могут быть ускорены по отдельности; по-видимому, они образуют пучки, содержащие, возможно, 10^{12} частиц, которые ускоряются как единая

частица. Это помогает понять и резкие границы импульсов, каждый из которых, вероятно, связан с отдельным пучком частиц.

Открытие. Первый пульсар открыли случайно в 1967 астрономы Кембриджского университета Дж. Белл и Э. Хьюиш. Испытывая новый радиотелескоп с аппаратурой для регистрации быстропеременного космического излучения, они неожиданно обнаружили цепочки импульсов, приходящих с четкой периодичностью. Первый пульсар имел период 1,3373 с и длительность импульса 0,037 с. Ученые назвали его CP 1919, что значит «кембриджский пульсар» (Cambridge Pulsar), имеющий прямое восхождение 19 ч 19 мин. К 1997 усилиями всех радиоастрономов мира было открыто более 700 пульсаров. Исследование пульсаров проводится с помощью крупнейших телескопов, поскольку для регистрации коротких импульсов необходима высокая чувствительность.

Строение пульсара. Нейтронные звезды имеют жидкое ядро и твердую кору толщиной ок. 1 км. Поэтому по структуре пульсары больше напоминают планеты, чем звезды. Быстрое вращение приводит к некоторой сплюснутости пульсара. Излучение уносит энергию и момент импульса, что вызывает торможение вращения. Однако твердая кора не позволяет пульсару постепенно становиться сферическим. По мере замедления вращения в коре накапливаются напряжения и наконец она ломается: звезда скачкообразно становится чуть более сферической, ее экваториальный радиус уменьшается (всего на 0,01 мм), а скорость вращения (в результате сохранения момента) немного возрастает. Затем вновь следует постепенное замедление вращения и новое «звездотрясение», приводящее к скачку скорости вращения. Так, изучая изменения периодов пульсаров, удастся многое узнать о физике твердой коры нейтронных звезд. В ней происходят тектонические процессы, как в коре планет, и, возможно, образуются свои микроскопические горы.

Двойные пульсары. Пульсар PSR 1913+16 стал первым, обнаруженным в двойной системе. Его орбита сильно вытянута, поэтому он очень близко подходит к своему соседу, который может быть только компактным объектом – белым карликом, нейтронной звездой или черной дырой. Высокая стабильность импульсов пульсара позволяет по доплеровскому смещению частоты их прихода очень точно изучать его орбитальное движение. Поэтому двойной пульсар был использован для проверки выводов общей теории относительности, согласно которой большая ось его орбиты должна поворачиваться в год примерно на 4° ; именно это и наблюдается.

Известно несколько десятков двойных пульсаров. Открытый в 1988 пульсар в двойной системе совершает 622 оборота в секунду. Его сосед с массой всего 2% солнечной, вероятно, был когда-то нормальной звездой. Но пульсар заставил его «похудеть», часть массы перетянув на себя, а часть – испарив и «сдув» в космическое пространство. Скоро пульсар окончательно уничтожит соседа и останется в одиночестве. Видимо, этим можно объяснить тот факт, что подавляющее число пульсаров – одиночки, тогда как не менее половины нормальных звезд входит в двойные и более сложные системы.

Расстояние до пульсаров. Проходя от пульсара до Земли, радиоволны преодолевают межзвездную среду; взаимодействуя в ней со свободными электронами, они замедляются – чем больше длина волны, тем сильнее замедление. Измерив задержку длинноволнового импульса относительно коротковолнового (которая достигает нескольких минут) и зная плотность межзвездной среды, можно определить расстояние до пульсара.

Как показывают наблюдения, в среднем в межзвездной среде приходится около 0,03 электрона на кубический сантиметр. Основанные на этой величине расстояния до пульсаров в среднем составляют несколько сотен световых лет. Но есть и более удаленные объекты: упомянутый выше двойной пульсар PSR 1913+16 удален на 18 000 св. лет.

П.1.4. Сверхновая звезда⁶⁸

Взрыв, которым ознаменована смерть звезды. Иногда вспышка сверхновой превышает по яркости галактику, в которой она произошла.

Сверхновые делят на два основных типа. Тип I отличается дефицитом водорода в оптическом спектре; поэтому считают, что это взрыв белого карлика – звезды, по массе близкой к Солнцу, но меньшей по размеру и более плотной. В составе белого карлика почти нет водорода, поскольку это конечный продукт эволюции нормальной звезды. В 1930-х годах С. Чандрасекар показал, что масса белого карлика не может быть выше определенного предела. Если он находится в двойной системе с нормальной звездой, то ее вещество может перетекать на поверхность белого карлика. Когда его масса превысит предел Чандрасекара, белый карлик коллапсирует (сжимается), нагревается и взрывается.

В спектрах сверхновых II типа наблюдаются линии водорода. Поэтому считают, что это результат взрыва нормальных звезд с внешними слоями, богатыми водородом. Излучение звезд обусловлено термоядерными реакциями, происходящими в их центральной части. Эти реакции разогревают звездное вещество, увеличивая давление на внешние слои и удерживая звезду от коллапса под действием собственной гравитации. Постепенно топливо в центре звезды истощается, и у нее образуется ядро, лишенное источника тепла. Если исходная масса звезды превышает массу Солнца более чем в 10 раз, то масса ее ядра может превысить предел Чандрасекара и оно стремительно коллапсирует, сбрасывая при этом внешние слои звезды в виде взрыва сверхновой. Само ядро может после этого стать нейтронной звездой – маленьким сверхплотным объектом, состоящим в основном из нейтронов.

Сверхновая II типа вспыхнула 23 февраля 1987 в соседней с нами галактике Большое Магелланово Облако. Ей дали имя Яна Шелтона, первым заметившего вспышку сверхновой с помощью телескопа, а затем и невооруженным глазом. (Последнее подобное открытие принадлежит Кеплеру, увидевшему вспышку сверхновой в нашей Галактике в 1604, незадолго до изобретения телескопа.) Одновременно с оптической вспышкой сверхновой 1987 специальные детекторы в Японии и в шт. Огайо (США) зарегистрировали поток нейтрино – элементарных частиц, рождающихся при очень высоких температурах в процессе коллапса ядра звезды и легко проникающих сквозь ее оболочку. Хотя поток нейтрино был испущен звездой вместе с оптической вспышкой примерно 150 тыс. лет назад, он достиг Земли практически одновременно с фотонами, доказав тем самым, что нейтрино не обладает массой и движется со скоростью света. Эти наблюдения подтвердили также предположение, что около 10% массы коллапсирующего ядра звезды излучается в виде нейтрино, когда само ядро сжимается в нейтронную звезду. У очень массивных звезд при вспышке сверхновой ядра сжимаются до еще больших плотностей и, вероятно, превращаются в черные дыры, но сброс внешних слоев звезды все же происходит.

В нашей Галактике Крабовидная туманность является остатком взрыва сверхновой, который наблюдали китайские ученые в 1054. Известный астроном Т. Браге также наблюдал в 1572 сверхновую, вспыхнувшую в нашей Галактике. Хотя сверхновая Шелтона стала первой близкой сверхновой, открытой после Кеплера, сотни сверхновых в других, более далеких галактиках были замечены при помощи телескопов за последние 100 лет.

В остатках взрыва сверхновой можно найти углерод, кислород, железо и более тяжелые элементы. Следовательно, эти взрывы играют важную роль в нуклеосинтезе – процессе образования химических элементов. Возможно, что 5 млрд. лет назад рождению Солнечной системы тоже предшествовал взрыв сверхновой, в результате которого возникли многие элементы, вошедшие в состав Солнца и планет.

⁶⁸ ЛИТЕРАТУРА

Псковский Ю.П. *Новые и сверхновые звезды*. М., 1985
Шкловский И.С. *Сверхновые звезды*. М., 1976

П.1.5. Черная дыра⁶⁹

Область в пространстве, возникшая в результате полного гравитационного коллапса вещества, в которой гравитационное притяжение так велико, что ни вещество, ни свет, ни другие носители информации не могут ее покинуть. Поэтому внутренняя часть черной дыры причинно не связана с остальной Вселенной; происходящие внутри черной дыры физические процессы не могут влиять на процессы вне ее. Черная дыра окружена поверхностью со свойством однонаправленной мембраны: вещество и излучение свободно падает сквозь нее в черную дыру, но оттуда ничто не может выйти. Эту поверхность называют «горизонтом событий». Поскольку до сих пор имеются лишь косвенные указания на существование черных дыр на расстояниях в тысячи световых лет от Земли, наше дальнейшее изложение основывается главным образом на теоретических результатах.

Черные дыры, предсказанные общей теорией относительности (теорией гравитации, предложенной Эйнштейном в 1915) и другими, более современными теориями тяготения, были математически обоснованы Р. Оппенгеймером и Х. Снайдером в 1939. Но свойства пространства и времени в окрестности этих объектов оказались столь необычными, что астрономы и физики в течение 25 лет не относились к ним серьезно. Однако астрономические открытия в середине 1960-х годов заставили взглянуть на черные дыры как на возможную физическую реальность. Их открытие и изучение может принципиально изменить наши представления о пространстве и времени.

Образование черных дыр. Пока в недрах звезды происходят термоядерные реакции, они поддерживают высокую температуру и давление, препятствуя сжатию звезды под действием собственной гравитации. Однако со временем ядерное топливо истощается, и звезда начинает сжиматься. Расчеты показывают, что если масса звезды не превосходит трех масс Солнца, то она выиграет «битву с гравитацией»: ее гравитационный коллапс будет остановлен давлением «вырожденного» вещества, и звезда навсегда превратится в белый карлик или нейтронную звезду. Но если масса звезды более трех солнечных, то уже ничто не сможет остановить ее катастрофического коллапса и она быстро уйдет под горизонт событий, став черной дырой. У сферической черной дыры массы M горизонт событий образует сферу с окружностью по экватору в 2π раз большей «гравитационного радиуса» черной дыры $R_G = 2GM/c^2$, где c – скорость света, а G – постоянная тяготения. Черная дыра с массой 3 солнечных имеет гравитационный радиус 8,8 км.

Если астроном будет наблюдать звезду в момент ее превращения в черную дыру, то сначала он увидит, как звезда все быстрее и быстрее сжимается, но по мере приближения ее поверхности к гравитационному радиусу сжатие начнет замедляться, пока не остановится совсем. При этом приходящий от звезды свет будет слабеть и краснеть, пока не потухнет совсем. Это происходит потому, что в борьбе с гигантской силой тяжести свет теряет энергию и ему требуется все больше времени, чтобы достичь наблюдателя. Когда поверхность звезды достигнет гравитационного радиуса, покинувшему ее свету потребуется бесконечное время, чтобы достичь наблюдателя (и при этом фотоны полностью потеряют свою энергию). Следовательно, астроном никогда не дожидается этого момента и тем более не увидит того, что происходит со звездой под горизонтом событий. Но теоретически этот процесс исследовать можно.

Расчет идеализированного сферического коллапса показывает, что за короткое время звезда сжимается в точку, где достигаются бесконечно большие значения плотности и тяготения. Такую точку называют «сингулярностью». Более того, общий математический анализ показывает, что если возник горизонт событий, то даже несферический коллапс приводит к сингулярности. Однако все это верно лишь в том случае, если общая теория относительности

⁶⁹ ЛИТЕРАТУРА

Черепашук А.М. *Массы черных дыр в двойных системах*. Успехи физических наук, т. 166, с. 809, 1996

применима вплоть до очень маленьких пространственных масштабов, в чем мы пока не уверены. В микромире действуют квантовые законы, а квантовая теория гравитации пока не создана. Ясно, что квантовые эффекты не могут остановить сжатие звезды в черную дыру, а вот предотвратить появление сингулярности они могли бы.

Современная теория звездной эволюции и наши знания о звездном населении Галактики указывают, что среди 100 млрд. ее звезд должно быть порядка 100 млн. черных дыр, образовавшихся при коллапсе самых массивных звезд. К тому же черные дыры очень большой массы могут находиться в ядрах крупных галактик, в том числе и нашей.

Как уже отмечалось, в нашу эпоху черной дырой может стать лишь масса, более чем втрое превышающая солнечную. Однако сразу после Большого взрыва, с которого ок. 15 млрд. лет назад началось расширение Вселенной, могли рождаться черные дыры любой массы. Самые маленькие из них в силу квантовых эффектов должны были испариться, потеряв свою массу в виде излучения и потоков частиц. Но «первичные черные дыры» с массой более 10^{15} г могли сохраниться до наших дней.

Все расчеты коллапса звезд делаются в предположении слабого отклонения от сферической симметрии и показывают, что горизонт событий формируется всегда. Однако при сильном отклонении от сферической симметрии коллапс звезды может привести к образованию области с бесконечно сильной гравитацией, но не окруженной горизонтом событий; ее называют «голой сингулярностью». Это уже не черная дыра в том смысле, как мы обсуждали выше. Физические законы вблизи голой сингулярности могут иметь весьма неожиданный вид. В настоящее время голая сингулярность рассматривается как маловероятный объект, тогда как в существование черных дыр верит большинство астрофизиков.

Свойства черных дыр. Для стороннего наблюдателя структура черной дыры выглядит чрезвычайно простой. В процессе коллапса звезды в черную дыру за малую долю секунды (по часам удаленного наблюдателя) все ее внешние особенности, связанные с неоднородностью исходной звезды, излучаются в виде гравитационных и электромагнитных волн. Образовавшаяся стационарная черная дыра «забывает» всю информацию об исходной звезде, кроме трех величин: полной массы, момента импульса (связанного с вращением) и электрического заряда. Изучая черную дыру, уже невозможно узнать, состояла ли исходная звезда из вещества или антивещества, имела ли она форму сигары или блина и т.п. В реальных астрофизических условиях заряженная черная дыра будет притягивать к себе из межзвездной среды частицы противоположного знака, и ее заряд быстро станет нулевым. Оставшийся стационарный объект либо будет невращающейся «шварцшильдовой черной дырой», которая характеризуется только массой, либо вращающейся «керровской черной дырой», которая характеризуется массой и моментом импульса. Единственность указанных выше типов стационарных черных дыр была доказана в рамках общей теории относительности В. Израэлем, Б. Картером, С. Хокингом и Д. Робинсоном.

Согласно общей теории относительности, пространство и время искривляются гравитационным полем массивных тел, причем наибольшее искривление происходит вблизи черных дыр. Когда физики говорят об интервалах времени и пространства, они имеют в виду числа, считанные с каких-либо физических часов и линеек. Например, роль часов может играть молекула с определенной частотой колебаний, количество которых между двумя событиями можно назвать «интервалом времени». Замечательно, что гравитация действует на все физические системы одинаково: все часы показывают, что время замедляется, а все линейки — что пространство растягивается вблизи черной дыры. Это означает, что черная дыра искривляет вокруг себя геометрию пространства и времени. Вдали от черной дыры это искривление мало, а вблизи так велико, что лучи света могут двигаться вокруг нее по окружности. Вдали от черной дыры ее поле тяготения в точности описывается теорией Ньютона для тела такой же массы, но вблизи гравитация становится значительно сильнее, чем предсказывает ньютонова теория. Любое тело, падающее на черную дыру, задолго до пересечения горизонта событий будет разорвано на части мощными приливными гравитационными силами, возникающими из-за разницы притяжения на разных расстояниях от центра.

Черная дыра всегда готова поглотить вещество или излучение, увеличив этим свою массу. Ее взаимодействие с окружающим миром определяется простым **принципом Хокинга**: площадь горизонта событий черной дыры никогда не уменьшается, если не учитывать квантового рождения частиц.

Дж. Бекенштейн в 1973 предположил, что черные дыры подчиняются тем же физическим законам, что и физические тела, испускающие и поглощающие излучение (модель «абсолютно черного тела»). Под влиянием этой идеи Хокинг в 1974 показал, что черные дыры могут испускать вещество и излучение, но заметно это будет лишь в том случае, если масса самой черной дыры относительно невелика. Такие черные дыры могли рождаться сразу после Большого взрыва, с которого началось расширение Вселенной. Массы этих первичных черных дыр должны быть не более 10^{15} г (как у небольшого астероида), а размер 10^{-15} м (как у протона или нейтрона). Мощное гравитационное поле вблизи черной дыры рождает пары частица–античастица; одна из частиц каждой пары поглощается дырой, а вторая испускается наружу. Черная дыра с массой 10^{15} г должно вести себя как тело с температурой 10^{11} К. Идея об «испарении» черных дыр полностью противоречит классическому представлению о них как о телах, не способных излучать.

Поиск черных дыр. Расчеты в рамках общей теории относительности Эйнштейна указывают лишь на возможность существования черных дыр, но отнюдь не доказывают их наличия в реальном мире; открытие настоящей черной дыры стало бы важным шагом в развитии физики. Поиск изолированных черных дыр в космосе безнадежно труден: мы не сможем заметить маленький темный объект на фоне космической черноты. Но есть надежда обнаружить черную дыру по ее взаимодействию с окружающими астрономическими телами, по ее характерному влиянию на них.

Сверхмассивные черные дыры могут находиться в центрах галактик, непрерывно пожирая там звезды. Сконцентрировавшись вокруг черной дыры, звезды должны образовать центральные пики яркости в ядрах галактик; их поиски сейчас активно ведутся. Другой метод поиска состоит в измерении скорости движения звезд и газа вокруг центрального объекта в галактике. Если известно их расстояние от центрального объекта, то можно вычислить его массу и среднюю плотность. Если она существенно превосходит плотность, возможную для звездных скоплений, то полагают, что это черная дыра. Этим способом в 1996 Дж. Моран с коллегами определили, что в центре галактики NGC 4258, вероятно, находится черная дыра с массой 40 млн. солнечных.

Наиболее перспективным является поиск черной дыры в двойных системах, где она в паре с нормальной звездой может обращаться вокруг общего центра масс. По периодическому доплеровскому смещению линий в спектре звезды можно понять, что она обращается в паре с неким телом и даже оценить массу последнего. Если эта масса превышает 3 массы Солнца, а заметить излучение самого тела не удастся, то очень возможно, что это черная дыра.

В компактной двойной системе черная дыра может захватывать газ с поверхности нормальной звезды. Двигаясь по орбите вокруг черной дыры, этот газ образует диск и, приближаясь по спирали к черной дыре, сильно нагревается и становится источником мощного рентгеновского излучения. Быстрые флуктуации этого излучения должны указывать, что газ стремительно движется по орбите небольшого радиуса вокруг крохотного массивного объекта.

С 1970-х годов обнаружено несколько рентгеновских источников в двойных системах с явными признаками присутствия черных дыр. Самой перспективной считается рентгеновская двойная V 404 Лебедя, масса невидимого компонента которой оценивается не менее чем в 6 масс Солнца. Другие замечательные кандидаты в черные дыры находятся в двойных рентгеновских системах Лебедь X-1, LMCX-3, V 616 Единорога, QZ Лисички, а также в рентгеновских новых Змееносец 1977, Муха 1981 и Скорпион 1994. За исключением LMCX-3, расположенной в Большом Магеллановом Облаке, все они находятся в нашей Галактике на расстояниях порядка 8000 св. лет от Земли.

П.1.6. Гравитационный коллапс⁷⁰

Быстрое сжатие и распад межзвездного облака или звезды под действием собственной силы тяготения. Гравитационный коллапс – очень важное астрофизическое явление; он участвует как в формировании звезд, звездных скоплений и галактик, так и в гибели некоторых из них.

В межзвездном пространстве существует множество облаков, состоящих в основном из водорода плотностью около 1000 ат/см^3 , размером от 10 до 100 св. лет. Их структура и, в частности, плотность непрерывно изменяются под действием взаимных столкновений, нагрева звездным излучением, давления магнитных полей и т.д. Когда плотность облака или его части становится настолько большой, что гравитация превосходит газовое давление, облако начинает неудержимо сжиматься – оно коллапсирует. Небольшие начальные неоднородности плотности в процессе коллапса усиливаются; в результате облако фрагментирует, т.е. распадается на части, каждая из которых продолжает сжиматься.

Вообще говоря, при сжатии газа возрастают его температура и давление, что может препятствовать дальнейшему сжатию. Но пока облако прозрачно для инфракрасного излучения, оно легко остывает, и сжатие не прекращается. Однако по мере нарастания плотности отдельных фрагментов их остывание затрудняется и возрастающее давление останавливает коллапс – так образуется звезда, а вся совокупность превратившихся в звезды фрагментов облака образует звездное скопление.

Коллапс облака в звезду или в звездное скопление продолжается около миллиона лет – сравнительно быстро по космическим масштабам. После этого термоядерные реакции, происходящие в недрах звезды, поддерживают температуру и давление, что препятствует сжатию. В ходе этих реакций легкие химические элементы превращаются в более тяжелые с выделением огромной энергии (подобное происходит при взрыве водородной бомбы). Выделившаяся энергия покидает звезду в виде излучения. Массивные звезды излучают очень интенсивно и сжигают свое «горючее» всего за несколько десятков миллионов лет. Звездам малой массы хватает их запаса топлива на многие миллиарды лет медленного горения. Рано или поздно у любой звезды топливо заканчивается, термоядерные реакции в ядре прекращаются и, лишенная источника тепла, она остается в полной власти собственной гравитации, неумолимо ведущей звезду к гибели.

Коллапс звезд малой массы. Если после потери оболочки остаток звезды имеет массу менее 1,2 солнечной, то его гравитационный коллапс не заходит слишком далеко: даже лишенная источников тепла сжимающаяся звезда получает новую возможность сопротивляться гравитации. При высокой плотности вещества электроны начинают интенсивно отталкиваться друг от друга; это связано не с их электрическим зарядом, а с их квантово-механическими свойствами. Возникающее при этом давление зависит только от плотности вещества и не зависит от его температуры. Такое свойство электронов физики называют вырождением. У звезд малой массы давление вырожденного вещества способно сопротивляться гравитации. Сжатие звезды останавливается, когда она становится размером приблизительно с Землю. Такие звезды называют белыми карликами, поскольку светят они слабо, но имеют сразу после сжатия довольно горячую (белую) поверхность. Однако температура белого карлика постепенно снижается, и через несколько миллиардов лет такую звезду уже трудно заметить: она становится холодным невидимым телом.

Коллапс массивных звезд. Если масса звезды более 1,2 солнечной, то давление вырожденных электронов не в состоянии сопротивляться гравитации, и звезда не может стать белым карликом. Ее неудержимый коллапс продолжается, пока вещество не достигнет плотности, сравнимой с плотностью атомных ядер (примерно $3 \cdot 10^{14} \text{ г/см}^3$). При этом большая

⁷⁰ ЛИТЕРАТУРА

Шкловский И.С. *Звезды: их рождение, жизнь и смерть*. М., 1984

часть вещества превращается в нейтроны, которые, подобно электронам в белом карлике, становятся вырожденными. Давление вырожденного нейтронного вещества может остановить сжатие звезды, если ее масса не превышает приблизительно 2 солнечных. Образовавшаяся нейтронная звезда имеет диаметр всего около 20 км. Когда стремительное сжатие нейтронной звезды резко останавливается, вся кинетическая энергия переходит в тепло и температура поднимается до сотен миллиардов кельвинов. В результате происходит гигантская вспышка звезды, ее внешние слои с большой скоростью выбрасываются наружу, а светимость возрастает в несколько миллиардов раз. Астрономы называют это «взрывом сверхновой». Примерно через год яркость продуктов взрыва уменьшается, выброшенный газ постепенно охлаждается, перемешивается с межзвездным газом и в следующие эпохи входит в состав звезд новых поколений. Возникшая в ходе коллапса нейтронная звезда в первые миллионы лет быстро вращается и наблюдается как переменный излучатель – пульсар. Если же масса коллапсирующей звезды значительно превышает 2 солнечных, то сжатие не останавливается на стадии нейтронной звезды, а продолжается до тех пор, пока ее радиус не уменьшится до нескольких километров. Тогда сила притяжения на поверхности возрастает настолько, что даже луч света не может покинуть звезду. Сжавшуюся до такой степени звезду называют черной дырой. Такой астрономический объект можно изучать только теоретически, используя общую теорию относительности Эйнштейна. Расчеты показывают, что сжатие невидимой черной дыры продолжается, пока вещество не достигнет бесконечно большой плотности.

П.2. Разбегание галактик и темная энергия⁷¹

Антитяготение действует на разбегающиеся галактики и стремится ещё более отдалить их друг от друга; из-за этого расширение вселенной происходит с ускорением. Ускоренное космологическое расширение было обнаружено в прямых астрономических наблюдениях на расстояниях в несколько миллиардов световых лет, почти у края видимой Вселенной. Скорости разбегающихся галактик и расстояния до них в расширяющейся Вселенной измеряют уже почти сто лет. Но измерить ускорение галактик впервые удалось лишь десять лет назад в результате длительных систематических наблюдений, проводившихся двумя независимо работавшими группами астрономов, одной из которых руководили Брайан Шмидт и Адам Райсс, другую возглавлял Сол Перлматтер. Изучались далёкие сверхновые звёзды определённого типа.

Наблюдения велись на самых мощных современных астрономических инструментах – космическом телескопе «Хаббл» и крупнейших наземных рефлекторах. Это позволило обнаружить и измерить тонкий релятивистский эффект, проявляющийся в зависимости видимой яркости источника от его красного смещения. Этот эффект определяется ускорением, с которым движется источник света, и становится заметным только на больших расстояниях, на которых красное смещение (относительное увеличение длины волны в наблюдаемом спектре источника) приближается к единице. Так было обнаружено, что космологическое расширение происходит с положительным ускорением – скорости разбегающихся галактик возрастают со временем.

Ускорение указывает на силу, которая определяет движение тел. Этой силой не может быть притяжение космических тел друг к другу: взаимное тяготение галактик способно лишь тормозить их разбегание. А ускорять это движение может лишь сила противоположного знака – она и называется всемирным антитяготением. Физический источник антитяготения – тёмная энергия, которая проявляет себя в мире только благодаря свойству создавать антитяготение. В остальном она невидима и неуловима: не излучает и не поглощает света, не рассеивает его. По макроскопическим свойствам тёмная энергия подобна особому рода сплошной среде с положительной плотностью и отрицательным давлением. Что касается физиче-

⁷¹ А.Д. Чернин Темная энергия и всемирное антитяготение // Успехи физических наук, 2008, Т. 178, №3, с. 267-300.

ской природы и микроскопической структуры тёмной энергии, то они остаются полностью неизвестными.

В простейшей (и как кажется, самой правдоподобной) её интерпретации тёмная энергия связывается с космологической постоянной Эйнштейна. Гипотеза об универсальном космическом отталкивании была выдвинута Эйнштейном в 1917 году, когда он впервые применил свою только что созданную общую теорию относительности к задаче о мире как целом.

В подходе к космологии Эйнштейн следовал давней натурфилософской традиции, которая приписывала Вселенной идеальную симметрию в пространстве (однородность и изотропию) и во времени. Симметрия во времени означает, что вечность и неизменность – неотъемлемые атрибуты существования мира. В соответствии с этими общими взглядами Эйнштейн построил теоретическую модель однородного и притом статического – вечного и неизменного – мира. Статичность, однако, не вытекала непосредственно из общей теории относительности. Для того, чтобы придать это свойство своей космологической модели, Эйнштейну пришлось прибегнуть к дополнительному предположению о существовании в природе всеобщего отталкивания, способного компенсировать и уравновесить всемирное тяготение во Вселенной как целом. Только при таком условии вещество мира, а с ним и вся Вселенная могли находиться в состоянии покоя.

Это предположение потребовало модифицировать уравнения общей теории относительности, добавить в них дополнительное слагаемое. Эйнштейновское антитяготение представлено и описано в общей теории относительности всего одной величиной – космологической постоянной Λ , которая всюду и всегда одинакова. Несложно понять, зачем, для какой цели Эйнштейну понадобилось всемирное антитяготение. Труднее представить себе, как, каким путём он смог найти ту простую и естественную форму, в которой он реализовал эту идею. Эйнштейн и сам не мог объяснить этого, хотя и пытался объяснить «извилистый и неровный путь» рассуждений, который привёл его к идее космологической постоянной. Только сейчас мы начинаем понимать значение и глубину его идеи: это было теоретическое предсказание необычайной глубины и смелости.

Через пять лет после Эйнштейна, в 1922 г., А.А. Фридман доказал, что наличие антитяготения не исключает эволюции мира, если только не требовать специально, чтобы между космическим притяжением и отталкиванием всегда существовало строгое равновесие. Фридман построил космологическую модель, которая обладала однородностью и изотропией в пространстве (как у Эйнштейна), но не была бы статической, – модель расширяющейся Вселенной. Эта модель описывается точными решениями уравнений общей теории относительности и содержит космологическую постоянную в качестве свободного физического параметра. Численное значение константы не вытекает из теории, оно подлежит измерению в специальных космологических наблюдениях.

Теория Фридмана с тем значением космологической постоянной, которое вытекает из последних мира и полностью согласуется со всем набором современных астрономических сведений. На её основе строится сегодняшняя «стандартная модель» космологии (в англоязычной литературе называемая Λ CDM cosmology (CDM – от английского Cold Dark Matter)).

Возвращаясь к предыстории новейших открытий, заметим, что Эйнштейн высоко оценил теорию Фридмана (хотя и не сразу). Сильное впечатление на него произвели также астрономические исследования Э. Хаббла, в которых теория расширяющейся Вселенной нашла – по общему мнению – прямое наблюдательное подтверждение. Но если реальный мир нестатичен, зачем нужна космологическая постоянная? Эйнштейн потерял похоже интерес к идее всемирного отталкивания и предложил забыть о космологической постоянной до тех пор, пока в её пользу не появятся, по его словам, «достаточно веские эмпирические основания». В нескольких изданиях Теории поля Ландау и Лифшица можно прочесть о космологической постоянной: «...нет никаких настоятельных и убедительных оснований ... для такого видоизменения уравнений тяготения». Как говорит В.Л. Гинзбург, «Л.Д. Ландау даже слы-

шать не хотел о Λ -члене, но добиться от него причины такой позиции мне не удалось». В те же годы против идеи космологической постоянной резко выступал В. Паули.

Интерес к космологической константе возникал в разные годы в связи с проблемой возраста мира. Очевидно, что Вселенная как целое не должна быть моложе населяющих её астрономических тел. Между тем по первоначальным (сильно заниженным) оценкам, основанным на данных Хаббла 1930-1940-х годов, возраст мира получался близким к 2 млрд. лет. Но это меньше геологического возраста Земли. Позднее возраст мира оценивали уже в 7-9 млрд. лет (после исправления систематической ошибки в данных Хаббла). Однако возраст самых старых образований в нашей галактике – шаровых скоплений звёзд – астрономы оценивали, как правило, величиной 12-15 млрд. лет. Идея космологической постоянной обещала решение этого тяжёлого парадокса, если, как отмечалось ещё в 1988 г., всеобщее отталкивание сильнее собственной гравитации вещества в современной Вселенной.

В стандартной модели плотность тёмной энергии определяется космологической постоянной, и поэтому эта плотность постоянна во времени и идеально однородна в пространстве. Более того, плотность тёмной энергии имеет одинаковое значение во всех системах отсчёта.

Плотность – главная количественная характеристика тёмной энергии. Если взять за меру массу атома водорода, то величина плотности тёмной энергии соответствует присутствию в каждом кубическом метре пространства трёх атомов водорода. Для того чтобы представить себе силу антитяготения, которую способна создать антигравитирующая среда с такой плотностью, вообразим, что два нейтральных атома водорода помещены в пространство, в котором нет ничего, кроме тёмной энергии. На эти атомы действуют две силы: ньютоновская сила их взаимного притяжения и эйнштейновская сила отталкивания. Оказывается, что антитяготение сильнее тяготения, если расстояние между атомами больше полуметра.

По некоторым данным на долю тёмной энергии приходится 70% полной плотности мира. Так что тёмная энергия представляет собой главный вид энергии/массы в наблюдаемой Вселенной. Понятно, что при таких условиях создаваемое тёмной энергией антитяготение должно доминировать в динамике космологического расширения. В природе существуют ещё три вида космической энергии. Одна из них – это тёмная материя, на которую по тем же данным приходится около 25% полной плотности мира; как предполагается, она состоит из гипотетических нерелятивистских («холодных») стабильных элементарных частиц, не участвующих в сильном ядерном взаимодействии.

П.3. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена

Логическая ситуация, возникающая при анализе мысленного эксперимента, предложенного в 1935 А. Эйнштейном, Б. Подольским (B. Podolsky) и Н. Розеном (N. Rosen) с целью разграничения двух возможных интерпретаций волновой функции в квантовой механике: статистическая интерпретация (Эйнштейн) – волновая ф-ция даёт вероятностное описание ансамбля тождеств, микросистем (квантового статистического ансамбля); копенгагенская интерпретация (Н. Бор)-волновая ф-ция даёт вероятностное описание индивидуальной микросистемы. В соответствии с первым утверждением выводы квантовой механики нельзя относить к индивидуальной микросистеме, поскольку они носят статистич. характер, второе – предполагает, что волновая ф-ция даёт максимально полное описание индивидуального микропроцесса и такое описание не может быть детерминированным. На опыте обе эти позиции неразличимы, т. к. вероятностные предсказания могут быть проверены только в результате статистич. обработки серии наблюдений.

Цель предложенного мысленного эксперимента – отождествить измерение с индивидуальным наблюдательным актом, что могло бы привести к противоречию, указывающему на неполноту квантовомеханич. описания. Предварительно были приняты два условия:

1) для полноты нек-рой физ. теории необходимо, чтобы каждый элемент физ. реальности имел соответствие в теории;

2) если, не возмущая систему, можно с определённой (т. е. с вероятностью, как угодно близкой к единице) предсказать значение нек-рой физ. величины, то существует элемент физ. реальности, отвечающий этой величине.

Чтобы пояснить ход рассуждений авторов парадокса ЭПР, рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Пусть неподвижная метастабильная частица с нулевым спином распадается на две разл. частицы со спином $1/2$ (напр., электрон и позитрон). Пропуская частицу 1 (электрон) через установку Штерна - Гёрлаха (см. Штерна - Герлаха опыт), можно определить проекцию её спина S_{1z} на направление z магн. поля в установке. Если она положительна, то для второй частицы (позитрона) соответствующая проекция спина S_{2z} должна быть отрицательна, т. к. полный спин системы сохраняется. Т. о., значение S_{2z} можно установить, не воздействуя на частицу 2. Согласно условию 2, существует элемент физ. реальности, отвечающий проекции спина S_{2z} .

В то же время, если магнитное поле в установке Штерна - Гёрлаха было бы ориентировано вдоль оси x , то установленному с помощью приведённого рассуждения значению проекции S_{2x} тоже отвечал бы элемент физ. реальности. Однако наблюдаемые S_z и S_x несовместны, т. е. не могут быть измерены одновременно, т. к. соответствующие операторы не коммутируют:

Отсюда, согласно условию 1, делается вывод о неполноте квантовой механики, т.к. паре элементов физ. реальности $\{S_{2z}, S_{2x}\}$ нет соответствия в теории.

Этот вывод, однако, неправомерен, т. к. измерения наблюдаемых типа S_z и S_x требуют взаимно исключающих эксперим. установок (см. Дополнительности принцип). Фактически предложенное рассмотрение допускало дополнит. гипотезу: если A и B по отдельности - элементы реальности, то пара $\{A, B\}$ - также элемент реальности, что не всегда справедливо.

Парадокс ЭПР, несмотря на ошибочность заключений, поставил новые вопросы, ответы на к-рые, возможно, будут получены лишь в будущей теории микромира. В частности, если пара $\{A, B\}$ не есть элемент физ. реальности (в силу несовместности наблюдаемых A и B), то, возможно, это объясняется тем, что существуют какие-то дополнит. (ненаблюдаемые) переменные (скрытые параметры), к-рые не описываются квантовой теорией и фиксация к-рых позволит получить более детальную картину мира. В таком случае на более глубоком, субквантовом, уровне описание могло бы быть детерминированным, а квантовое описание должно восстанавливаться после усреднения по скрытым параметрам, т.е. средние значения в такой теории должны совпадать с квантовыми средними. Анализ этой проблемы привёл Дж. Белла (J. Bell) в 1964 к выводу о существенно нелокальной природе теорий со скрытыми параметрами (см. Белла неравенства), что, в свою очередь, поставило новые вопросы, требующие разрешения.

J. Bell began by assuming the existence of some form of hidden variable with a value that would determine whether the measured angular momentum gives a plus or minus result. He further assumed locality—namely, that measurement on one proton (*i.e.*, the choice of the measurement direction) cannot affect the result of the measurement on the other proton. Both these assumptions agree with classical, commonsense ideas. He then showed quite generally that these two assumptions lead to a certain relationship, now known as Bell's inequality, for the correlation values mentioned above. Experiments have been conducted at several laboratories with photons instead of protons (the analysis is similar), and the results show fairly conclusively that Bell's inequality is violated. That is to say, the observed results agree with those of quantum mechanics and cannot be accounted for by a hidden variable (or deterministic) theory based on the concept of locality. One is forced to conclude that the two protons are a correlated pair and that a measurement on one affects the state of both, no matter how far apart they are. This may strike one as highly peculiar, but such is the way nature appears to be.

It may be noted that the effect on the state of proton 2 following a measurement on proton 1 is believed to be instantaneous; the effect happens before a light signal initiated by the measuring event

at proton 1 reaches proton 2. Alain Aspect and his coworkers in Paris demonstrated this result in 1982 with an ingenious experiment in which the correlation between the two angular momenta was measured, within a very short time interval, by a high-frequency switching device. The interval was less than the time taken for a light signal to travel from one particle to the other at the two measurement positions. Einstein's special theory of relativity states that no message can travel with a speed greater than that of light. Thus, there is no way that the information concerning the direction of the measurement on the first proton could reach the second proton before the measurement was made on it.

Лит.: Эйнштейн А., Собр. науч. трудов, т. 3, М., 1966; Бор Н., Атомная физика и человеческое познание, пер. с англ., М., 1961; фон Нейман Дж., Математические основы квантовой механики, пер. с нем., М., 1964; Мандельштам Л. И., Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике, М., 1972; Садбери А., Квантовая механика и физика элементарных частиц, пер. с англ., М., 1989; Философские исследования оснований квантовой механики. (К 25-летию неравенств Белла), М., 1990; Рыбаков Ю. П., Терлецкий Я. П., Квантовая механика, М., 1991; Дискуссионные вопросы квантовой физики. Памяти В. В. Курышкина, М., 1993.

П.4. Неравенства Белла

Белла неравенства, справедливые для любой классич. статистич. системы, в к-рой невозможно распространение сигналов со скоростью больше скорости света (требование локальности); установлены Дж. С. Беллом [1]. Получены с целью продемонстрировать отличие предсказаний квантовой механики от предсказаний любой теории скрытых параметров, удовлетворяющей требованиям спец. теории относительности.

Пусть в нек-рой точке 1 измеряется величина A_a , а в точке 2, отделённой пространственноподобным интервалом от 1, - величина B_b , причём обе величины могут принимать значения ± 1 , а индексы a, b означают зависимость этих величин от направления в пространстве. Предположим, что определ. результат измерения A , кроме направления a , зависит от значения нек-рого скрытого параметра λ , а результат измерения B - от направления b и того же λ , локализованного в области пространства-времени Ω , образованной пересечением световых конусов прошлого точек 1 и 2. "Локальность" скрытых параметров означает, что A не зависит от b , а B не зависит от a . Поэтому любые корреляции между A и B могут быть обусловлены только общим прошлым, в к-ром заданы K . Это утверждение, очевидно, верно для любой классич. релятивистской статистич. системы.

В квантовой механике, не предполагающей существования скрытых параметров, Б. н. в общем случае не имеют места. Поэтому экспериментальная проверка нарушения Б. н. явилась мощным средством проверки квантовой механики и её интерпретации. Поставленные эксперименты типа Эйнштейна - Подольского - Розена (см. Эйнштейна - Подольского - Розена парадокс) с парами частиц - фотонов и нуклонов [2, 3] убедительно свидетельствуют в пользу квантовой механики в её копенгагенской интерпретации против теории скрытых параметров. В этих экспериментах роль A_a, B_b, A_a, B_b играют проекции спина частицы на то или иное направление, определяемое прибором. Нарушение Б. н. связано с тем, что поворот одного прибора, регистрирующего частицу,

согласно квантовой механике, меняет информацию о системе и, следовательно, определенным образом влияет на вероятность регистрации частицы др. прибором, несмотря на то, что никакого материального носителя этого влияния (частицы или поля) не существует. Связано это с тем, что при измерении в квантовой механике происходит редукция волнового пакета.

С точки зрения изложенного вывода Б. н. это означает нарушение локальности (понимаемой Беллом как выполнение требования, чтобы измерение, производимое в точке А, не влияло на результаты измерения, производимого в точке В; не путать с локальностью в квантовой теории поля!). Поэтому ряд авторов называет это свойство квантовой механики «нелокальностью».

П.5. Персоналии

Ученый	Краткие сведения
Алферов Жорес Иванович (р. 15 марта 1930, Витебск)	<p>Российский физик, академик РАН (1991; член-корреспондент, 1972, академик АН СССР, 1979), вице-президент РАН (с 1991; вице-президент АН СССР с 1990). Председатель Президиума Ленинградского (Санкт-Петербургского) научного центра РАН с 1989.</p> <p>Окончил Ленинградский электротехнический институт (1952). Основные труды в области физики полупроводников, полупроводниковой и квантовой электроники, технической физики. Участвовал в создании отечественных транзисторов, фотодиодов, германиевых выпрямителей высокой мощности. Обнаружил явление сверхинжекции в гетероструктурах. Создал «идеальные» полупроводниковые гетероструктуры. Положил начало новому направлению — гетеропереходам в полупроводниках. Ленинская премия (1972), Государственная премия СССР (1984). Нобелевская премия (2000).</p>
Аристотель (384–322 до н.э.)	<p>Древнегреческий философ и педагог, родился в Стагире в 384 или 383 до н.э., умер в Халкиде в 322 до н.э. Почти двадцать лет Аристотель учился в Академии Платона и, по-видимому, какое-то время там преподавал. Покинув Академию, Аристотель стал воспитателем Александра Македонского. Как основатель Ликейя в Афинах, продолжавшего свою деятельность многие столетия после его смерти, Аристотель внес существенный вклад в античную систему образования. Он задумал и организовал широкомасштабные естественнонаучные изыскания, которые финансировал Александр. Эти исследования привели ко многим фундаментальным открытиям, однако величайшие достижения Аристотеля относятся к области философии.</p>
Архимед (ок. 287–212 до н.э.)	<p>Величайший древнегреческий математик и механик. Уроженец греческого города Сиракузы на острове Сицилия, Архимед был приближенным управлявшего городом царя Гиерона (и, вероятно, его родственником). В истории физики Архимед известен как один из основоположников успешного применения геометрии к статике и гидростатике. В I книге сочинения <i>О равновесии плоских фигур</i> он приводит чисто геометрический вывод закона рычага. По сути, его доказательство основано на сведении общего случая рычага с плечами, обратно пропорциональными приложенным к ним силам, к частному случаю равноплечего рычага и равных сил. Все доказательство от начала и до конца пронизано идеей геометрической симметрии.</p>

	<p>Средневековые латиноязычные ученые впервые услышали об Архимеде в 12 в., когда появились два перевода с арабского на латынь его сочинения <i>Об измерении круга</i>. В 1269 доминиканец Вильгельм из Мербеке перевел с древнегреческого весь корпус работ Архимеда.</p>
Бардин Джон (1908 - 1991)	<p>Американский физик, член Национальной академии наук (1954), иностранный член Академии наук СССР (1982). В 1968-1969 был президентом Американского физического общества. Окончил Висконсинский и Принстонский университеты. Основные работы в области физики твердого тела. Создал первый транзистор (1948, совместно с У. Браттейном). Один из авторов (1957) микроскопической теории сверхпроводимости (теория Бардина-Купера-Шриффера). Предложил метод эффективного гамильтониана (модель туннелирования Бардина) в теории туннелирования. Бардин — единственный ученый, дважды удостоенный Нобелевской премии по физике (1956, совместно с У. Браттейном и У. Шокли; 1972, совместно с Л. Купером и Дж. Шриффером).</p>
Блохинцев Дмитрий Иванович (1907-1979)	<p>Член-корреспондент АН СССР (1958) и АН Украины (1939), Герой Социалистического Труда (1956). Один из руководителей создания первой в мире АЭС. Труды по квантовой механике, атомной и ядерной физике, теории ядерных реакторов, физике элементарных частиц, методологии физики. Ленинская премия (1957), Государственные премии СССР (1952, 1971). Он явился основателем кафедры теоретической и ядерной физики в Саратовском госуниверситете</p>
Бор Нильс (1885 – 1962)	<p>Выдающийся датский физик, Нобелевская премия по физике, 1922 г., один из создателей современной физики атома и атомного ядра. Основатель (1920) и руководитель Института теоретической физики в Копенгагене (Институт Нильса Бора); создатель мировой научной школы; иностранный член АН СССР (1929). В 1943-45 работал в США. Создал теорию атома, в основу которой легли планетарная модель атома Резерфорда, квантовые представления Планка и Эйнштейна и предложенные им постулаты, называемые постулатами Бора.</p>
Браттейн Уолтер (1902 - 1987)	<p>Американский физик; открыл (1948) совместно с Дж. Бардином транзисторный эффект и создал первый транзистор. Лауреат Нобелевской премии за создание полупроводниковых транзисторов и изучение физических принципов их действия (1956, совместно с Дж. Бардином и У. Шокли). Образование получил в университетах Уолла-Уолла (штат Вашингтон), Аризоны и Миннесоты. Преподавал в различных университетах США. Исследовал поверхностные свойства полупроводников (определение скорости рекомбинации и распределение потенциала на поверхности полупроводника). Ряд работ посвящен изучению полупроводниковых свойств окиси меди, исследованию оптических свойств германиевых плёнок, измерению проводимости под действием облучения альфа-частицами.</p>
Гамильтон Уильям Роуан (1805-1865)	<p>Ирландский математик и физик, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (1837). С 1827 года профессор Дублинского университета и директор астрономической обсерватории. Дал точное формальное изложение теории комплексных чисел. Построил систему</p>

	<p>чисел — кватернионов. В механике дал общий принцип наименьшего действия. Установил аналогию между классической механикой и геометрической оптикой, основанную на применении т.н. характеристической функции (функции Гамильтона). Аналогия между корпускулярной и волновой оптикой, развитая Гамильтоном, долгое время была почти забыта, и только через 100 лет ее использовал Э. Шрёдингер при разработке своей волновой механики.</p>
<p>Гинзбург Виталий Лазаревич р. 21.9(4.10).1916, Москва</p>	<p>Выдающийся советский и российский физик, академик АН СССР (1966; член-корреспондент 1953). Окончил Московский университет (1938). С 1940 работает в Физическом институте АН СССР. Основные труды по теории распространения волн в ионосфере, радиоастрономии, вопросам происхождения космических лучей, термодинамической теории сегнетоэлектрических явлений, теории сверхпроводимости, оптике, теории излучения, астрофизике и др. В 1940 Г. разработал квантовую теорию эффекта Черенкова - Вавилова и теорию черенковского излучения в кристаллах. Совместно с Л. Д. Ландау создал феноменологическую теорию <u>сверхпроводимости</u>. В 1950-51 работал над проблемами термоядерных реакций. С 1958 исследует вопросы теории экситонов и кристаллооптики, разработал теорию магнитотормозного космического радиоизлучения и радиоастрономическую теорию происхождения космических лучей. Государственная премия СССР (1953), Ленинская премия (1966). Лауреат Нобелевской премии 2003 г. за работы по сверхпроводимости.</p>
<p>Гейзенберг Вернер (1901-1976)</p>	<p>Всемирно известный немецкий физик, создатель матричной квантовой механики, лауреат Нобелевской премии за 1932 год. Работы относятся к квантовой механике, квантовой электродинамике, релятивистской квантовой теории поля, теории ядра, магнетизму, физике космических лучей, теории элементарных частиц, философии естествознания. Вместе с Полем Дираком в 1928 году Гейзенберг выдвинул идею обменного взаимодействия, введя обменные силы. В 1932 году пришел к протонно-нейтронной модели ядра, ввел понятие изотопического спина, показал, что ядерные силы насыщающие. В 1943 году ввел в квантовую теорию поля матрицу рассеяния (S-матрицу). В годы 2-й мировой войны возглавлял немецкий проект создания атомной бомбы. В последние годы усилия Гейзенберга были направлены на создание единой теории поля. Интересны работы Гейзенберга в области философии физики, теории познания, многие из которых переведены на русский язык. Гейзенберг был почетным членом многих академий наук и научных обществ.</p>
<p>Де Бройль Луи (1892-1987)</p>	<p>Один из создателей квантовой механики - всемирно известный ученый, чьи работы в области теоретической физики, а также выдающийся литературный талант глубоко изменили современную физику и поставили его в один ряд с самыми выдающимися учеными нашего времени. Он первым пришел к выводу, что дуализм волна-частица - явление природы, а не ухищрения математиков для преодоления каких-то расходимостей. Его расчеты волновых свойств частиц были подтверждены экспериментально (дифракция электронов). Луи де Бройль лауреат Нобелевской премии за 1929 года по физике за открытие волновых свойств электрона в 1923 году.</p>
<p>Дирак Поль (1902-1984)</p>	<p>Выдающийся английский физик-теоретик, один из основателей <u>квантовой механики</u>, член Лондонского королевского общества (1930). Учился в Бристольском, затем в Кембриджском университетах (окон-</p>

	чил в 1924). С 1932 профессор Кембриджского университета. Особенно важным результатом теории Д. было то, что она предсказывала существование частицы с массой, равной массе электрона, но обладающей положительным зарядом. Д. иностранный член АН СССР (1931). Нобелевская премия (1933).
Королев Сергей Павлович (1906/07-1966)	Российский ученый и конструктор, академик АН СССР (1958), дважды Герой Социалистического Труда (1956, 1961). Под руководством Королева созданы баллистические и геофизические ракеты, первые искусственные спутники Земли, спутники различного назначения («Электрон», «Молния-1», «Космос», «Зонд» и др.), космические корабли «Восток», «Восход», на которых впервые в истории совершены космический полет человека и выход человека в космос. Ленинская премия (1957). Репрессирован в 1938-44; находился в заключении на Колыме (1938-40); затем работал в КБ в Москве (1940-42) и Казани (1942-44).
Ландау Лев Давидович (1908 – 1968)	Выдающийся советский физик, лауреат Нобелевской премии 1962 г., академик АН СССР (1946), Герой Социалистического Труда (1954). Родился в семье инженера-нефтяника. После окончания Ленинградского университета (1927) аспирант Ленинградского физико-технического института. В 1927 был командирован в Данию к Н. Бору, в Англию и Швейцарию. В 1932 возглавил теоретический отдел Украинского физико-технического института в Харькове. С 1937 - в институте физических проблем АН СССР. С 1947 профессор МГУ. В 1941 создал теорию <u>сверхтекучести</u> жидкого гелия. В 1950 совместно с В. Л. Гинзбургом построил полуфеноменологическую теорию <u>сверхпроводимости</u> . В 1940—65 опубликовал совместно с Е. М. Лифшицем фундаментальный курс теоретической физики (Ленинская премия, 1962). Л. создал многочисленную школу физиков-теоретиков. К числу его учеников принадлежат И. Я. Померанчук, А. Б. Мигдал, И. М. Лифшиц, А. А. Абрикосов, Е. М. Лифшиц, И. М. Халатников и др. Именем Л. назван институт теоретической физики АН СССР.
Менделеев Дмитрий Иванович (1834-1907)	Русский химик, разносторонний ученый, педагог. Открыл (1869) периодический закон химических элементов — один из основных законов естествознания. Оставил св. 500 печатных трудов, среди которых классические «Основы химии» (ч. 1-2, 1869-71, 13 изд., 1947) — первое стройное изложение неорганической химии. Автор фундаментальных исследований по химии, химической технологии, физике, метрологии, воздухоплаванию, метеорологии, сельскому хозяйству, экономике, народному просвещению и др., тесно связанных с потребностями развития производительных сил России. Заложил основы теории растворов, предложил промышленный способ фракционного разделения нефти, изобрел вид бездымного пороха, пропагандировал использование минеральных удобрений, орошение засушливых земель. Один из инициаторов создания Русского химического общества (1868). Профессор Петербургского университета (1865-90), ушел в отставку в знак протеста против притеснения студенчества. С 1876 член-корреспондент Петербургской АН, в 1880 выдвигался в академики, но был забаллотирован, что вызвало резкий общественный протест. Организатор и первый директор (1893) Главной палаты мер и весов (ныне ВНИИ метрологии им. Менделеева).
Паули Вольфганг (1900 – 1958)	Швейцарский физик-теоретик, автор классических работ по <u>квантовой механике</u> . Окончил университет в Мюнхене (1921). В 1921-22 был

	<p>ассистентом у М. Борна в Гёттингене, в 1922-23 - у Н. Бора в Копенгагене. В 1923 доцент университета в Гамбурге, в 1928 профессор Высшего технического училища в Цюрихе. В 1940-46 приглашенный профессор в институте фундаментальных исследований в Принстоне (США). Работа по объяснению аномального <u>Зеемана эффекта</u> привела П. к формулировке (1925) важнейшего квантовомеханического принципа (принцип Паули). Доказал, что все частицы с полуцелым спином подчиняются принципу П. (1940). Вместе с П. Иорданом и В. Гейзенбергом П. заложил основы релятивистской квантовой теории поля (1929), в разработке которой он затем принял активное участие. При обсуждении особенностей β-распада П. выдвинул гипотезу о существовании <u>нейтрино</u> (1930-33). П. принадлежат также работы по мезонной теории ядерных сил, ряд обзоров по важнейшим вопросам современной теоретической физики, статьи по истории и философии науки и др. Нобелевская премия (1945).</p>
<p>Планк Макс (1858 – 1947)</p>	<p>Немецкий физик-теоретик. Родился в семье юриста. Учился в Мюнхенском (1874-77) и Берлинском (1877-78) университетах; слушал лекции Г. Гельмгольца, Г. Кирхгофа. С 1880 приват-доцент Мюнхенского университета. Профессор университетов в Киле (1885) и Берлине (1889). Член Берлинской АН (1894, в 1912-43 её неперемный секретарь). Президент Общества императора Вильгельма (с 1948 - Общество М. Планка). Введение кванта действия h было началом эпохи новой, квантовой физики. В ряде статей и лекций П. обсуждал философские и методологические проблемы естествознания. П.- член-корреспондент Петербургской АН (1913), почётный член АН СССР (1926), член Лондонского королевского общества (1926). Нобелевская премия (1918).</p>
<p>Резерфорд Эрнест (1871-1937)</p>	<p>Основоположник науки о строении атома и атомного ядра. Родился в Новой Зеландии, профессор физики Монреальского, с 1907 г. Манчестерского, а с 1919 г. Кембриджского университетов. Он открыл три вида радиоактивных лучей и совместно с Содди создал теорию радиоактивности, за которую в 1908 г. удостоен Нобелевской премии по химии. В 1911 г. предложил ядерную модель строения атома. В 1919 впервые осуществил ядерную реакцию с превращением химических элементов. Почетный член АН СССР.</p>
<p>Ферми Энрико (1901 – 1954)</p>	<p>Выдающийся итальянский физик, внёсший большой вклад в развитие современной теоретической и экспериментальной физики. После окончания в 1922 Пизанского университета учился в Германии и Нидерландах. В 1926-38 гг. профессор Римского университета; Ф. оказал большое влияние на формирование итальянской школы современной физики. В 1938 он эмигрировал из фашистской Италии. В 1939-45 профессор Колумбийского университета, руководил исследовательскими работами США в области использования ядерной энергии. С 1946 профессор Чикагского университета. Ф. принимал деятельное участие в создании основ квантовой физики. В 1925 он разработал статистику частиц, подчиняющихся принципу Паули. В 1934 создал количественную теорию β-распада, основанную на предположении В. Паули о том, что β-частицы испускаются одновременно с нейтрино. В 1934-38 гг. Ф. с сотрудниками изучал свойства нейтронов и практически заложил основы нейтронной физики; впервые наблюдал искусственную радиоактивность, вызванную бомбардировкой ней-</p>

	тронами ряда элементов (в т. ч. урана), открыл явление замедления нейтронов и создал теорию этого явления (Нобелевская премия, 1938). В декабре 1942 Ф. впервые удалось осуществить ядерную цепную реакцию в построенном им первом в мире ядерном реакторе.
Циолковский Константин Эдуардович (1857-1935)	Российский ученый и изобретатель, основоположник современной космонавтики. Труды в области аэро- и ракетодинамики, теории самолета и дирижабля. В детстве почти полностью потерял слух и с 14 лет учился самостоятельно; в 1879 экстерном сдал экзамен на звание учителя, всю жизнь преподавал физику и математику (с 1892 в Калуге). Впервые обосновал возможность использования ракет для межпланетных сообщений, указал рациональные пути развития космонавтики и ракетостроения, нашел ряд важных инженерных решений конструкции ракет и жидкостного ракетного двигателя. Технические идеи Циолковского находят применение при создании ракетно-космической техники.
Шокли Уильям (1910 - 1989)	Американский физик, один из создателей транзистора, автор трудов по физике твердого тела (физика полупроводников, ферромагнетизм, пластичность металлов, теория дислокаций), лауреат Нобелевской премии (1956). В 1948 открыл транзисторный эффект.
Шрёдингер Эрвин (1887-1961)	Австрийский физик, один из создателей квантовой механики. Окончил Венский университет (1910). С 1911 работал в Физическом институте Венского университета. В 1933-35 профессор Оксфордского университета, в 1936-38 - университета в Граце, в 1938-39 - в Генте, с 1940 профессор Королевской академии в Дублине, затем директор основанного им Института высших исследований. С 1956 профессор Венского университета. Основные труды по математической физике, теории относительности, физике атома и биофизике. Важнейшей заслугой Ш. является создание им волновой механики (конец 1925 - начало 1926). Установил связь волновой механики с "матричной механикой" В. Гейзенберга, М. Борна и П. Йордана и доказал их физическую тождественность. Нобелевская премия (1933). Иностраный член АН СССР (1934)..
Эдисон Томас Алва (1847-1931)	□Американский изобретатель и предприниматель, организатор и руководитель первой американской промышленно-исследовательской лаборатории (1872, Менло-Парк), иностранный почетный член АН СССР (1930). Для деятельности Эдисона характерны практическая направленность, разносторонность, непосредственная связь с промышленностью. Автор св. 1000 изобретений, главным образом в различных областях электротехники. Усовершенствовал телеграф и телефон, лампу накаливания (1879), изобрел фонограф (1877) и др., построил первую в мире электростанцию общественного пользования (1882), обнаружил явление термоионной эмиссии (1883) и мн. др.
Эйнштейн Альберт (1879-1955)	Великий физик - создатель теории относительности, один из создателей квантовой теории и статистической физики. Родился в Германии, с 14 лет жил, учился и работал в Швейцарии сначала преподавателем в школе, затем экспертом патентного бюро. После опубликования в 1905 г. трех выдающихся работ по специальной теории относительности, статистической физике и фотоэлектрическому эффекту в 1909 г. принят профессором Цюрихского университета, с 1914 по 1933 гг. профессор Берлинского университета. В 1933 г. в знак протеста против гитлеровского режима отказался от германского подданства и от звания члена Прусской Академии наук и эмигрировал в США, где до

<p>конца жизни работал в Институте фундаментальных исследований в г. Принстоне. Лауреат Нобелевской премии 1921 г. за теорию фотоэлектрического эффекта. С 1927 г. – почетный член Академии наук СССР.</p>
--

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Физическая энциклопедия в 5 т. / Под. ред. А.М. Прохорова. – М.: 1998. Электронная версия, 2005.
2. Физический энциклопедический словарь / под ред. А.М. Прохорова. – М.: «Советская энциклопедия», 1983.
3. А.Г. Роках. От мистики к физике. И обратно? Учебное пособие. – Саратов, 2000, 136 с.

Дополнительная

4. Р. Пенроуз. Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики. – М.: Едиториал УРСС 2003. – 384 с.
5. В.Л. Гинзбург. О науке, о себе и о других. – М.: Физматлит, 2001.
6. Э. Шредингер. Что такое жизнь. Физический аспект живой клетки. – Ижевск, 1999.
7. В.С. Степин, В.Г. Горохов, М.А. Розин. Философия науки и техники. – М.: 2001.
8. Компьютерная энциклопедия «Мир вокруг нас». Москва, 2000.
9. А.Г. Роках. От физики к психике. – Саратов, 2004, 197 с.
10. Encyclopaedia Britannica, 2006. Электронная версия.
11. Р. Фейнман, Р. Лейтон, Р. Сэнде. Фейнмановские лекции по физике в 9 тт. – М.: «Мир», 1967.
12. Ричард Л. Томпсон. Механистическая и немеханистическая наука. – М.: «Философская книга», 1998. – 302 с.
13. Р. Пенроуз, А. Шимони, Н. Картрайт, С. Хокинг. Большое, малое и человеческий разум. – М.: Мир, 2004. – 191 с. – (Рубежи науки).
14. В.Д. Захаров. Физика как философия природы. – М.: Едиториал УРСС, 2005. - 232 с.
15. Ю.С. Владимиров. Метафизика. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2002. - 550 с.
16. В защиту науки / [Отв. ред. Э.П. Кругляков]; Комиссия по борьбе с лженаукой и фальсификацией науч. исслед. РАН. – М.: Наука, 2006 - 2008. Бюлл. №№ 1-4.
17. «Капра Ф. Дао физики»: «ОРИС», «ЯНА-ПРИНТ»; 1994.
18. Дэвид Дойч. Структура Реальности. - Москва-Ижевск: РХД, 2001.

ВОПРОСЫ ПО КУРСУ

1. Особенности физического познания
2. Знание и вера в науке
3. Геометрия физического пространства
4. Роль математики в физическом исследовании
5. Гамильтониан и его роль в классической механике
6. Почему Луна обращена одной стороной к Земле?
7. «Отклонения» от причинности в классической механике
8. Тепловые процессы и термодинамика

9. Превращения энергии в термодинамике
10. Энтропия и ее значение в науке
11. Термодинамика неравновесных процессов. Теорема Онсагера
12. Синергетика
13. Токи смещения и уравнения Максвелла
14. Световые волны и эфир
15. Постулаты СТО
16. ОТО и ее экспериментальная проверка
17. Эйнштейн – создатель теории относительности
18. Почему А. Эйнштейн иногда называл теорию относительности теорией абсолютности?
19. Эффект близнецов
20. Инертная и гравитационная масса
21. Связь между массой и энергией
22. Оптические спектры и дискретность энергии
23. История создания квантовых представлений о материи
24. О физическом смысле квантовой механики
25. Квантовая механика атома
26. Принцип Паули и его проявления в микро и мегамире.
27. Почему синий свет преломляется сильнее, чем красный?
28. Строение атомного ядра
29. Ядерные силы
30. Элементарные частицы: мезоны.
31. Классификация элементарных частиц
32. Кошка Шредингера
33. Аксиоматическое построение физической теории
34. История астрофизических открытий
35. Формирование и жизнь звезд
36. Происхождение Вселенной
38. Нерешенные проблемы космологии.
39. Черные дыры и темная материя
40. Способна ли физика описать сознание?
41. Альтернативные (псевдонаучные) теории в физике
42. Религиозные картины мира
43. Научная физическая картина мира
44. История развития техники
45. Социальная роль техники
46. Искусственный и естественный интеллект
47. Психика человека и ее роль в научном познании
48. Возможности искусственного интеллекта
49. Искусственные органы чувств и искусственный интеллект
50. Может ли современная техника воспроизвести интеллект человека?
51. Взаимодействие видимого излучения с веществом
52. Принцип запрета Паули в космологии
53. Кварки и глюоны
54. Законы сохранения и симметрия
55. Микро- и мегамир. Общие процессы
56. Виртуальные частицы
57. Виды взаимодействий в природе
58. Закон обратных квадратов в физике
59. Оптические спектры и квантовая механика
60. Закон сохранения энергии- массы

61. Квантовая психология
62. Роль сознания в квантовой механике
63. Квантовый компьютер
64. Искусственные нейросистемы и нейрокомпьютер.
65. Дайте пример физического эксперимента, свидетельствующего в пользу многомировой концепции Эверетта.
66. Причина «общности взглядов» восточных мистиков и современных физиков.
67. Приведите 2-3 примера диаграмм Фейнмана и дайте их объяснение.

ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ

1. Термодинамика и информация.
2. Принцип запрета Паули в микро- и мегамире.
3. Жизнь с позиций физики.
4. Ядерные силы.
5. Астрофизика. Нерешенные проблемы.
6. Физика и разум. Возможность объяснения.
7. Альтернативные (псевдонаучные) гипотезы в физике.
8. Сознание человека и искусственный интеллект.
9. Темная материя и темная энергия..
10. Наука, псевдонаука и религия о происхождении и устройстве мироздания.
11. Теория относительности или абсолютности?
12. Сильное и слабое взаимодействия.
13. Непостижимая эффективность квантовой механики.
14. Квантовая механика и сознание.
15. Кварки как «истинно элементарные» частицы.
16. Естественный и искусственный интеллект.
17. Может ли техника сделать то, чего пока не знает физика?
18. История развития технического образования.
19. Квантовые вычисления и квантовый компьютер.
20. Реализации модели сознания на квантовом компьютере.
21. Нейрокомпьютеры сегодня.
22. Мировые линии элементарных частиц: диаграммы Фейнмана.
23. Общность и различие метафизики микромира и восточного мистицизма.
24. Концепция множества вселенных для объяснения явлений микромира.