

ФИЛОСОФСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Г. Я. МЯКИШЕВ

**ДИНАМИЧЕСКИЕ
И СТАТИСТИЧЕСКИЕ
ЗАКОНОМЕРНОСТИ
В ФИЗИКЕ**



ФИЛОСОФСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Г. Я. МЯКИШЕВ

ДИНАМИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ФИЗИКЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1973

530.1

М 99

УДК 530.16

Динамические и статистические закономерности в физике. Мякишев Г. Я., монография, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1973.

В книге на основе конкретного фактического материала детально анализируется соотношение между динамическими и статистическими закономерностями в физике. Показывается, что динамические законы представляют собой первый, низший этап в процессе познания окружающего нас мира, статистические же законы являются более совершенным отображением объективных связей в природе, являются следующим, более высоким этапом познания.

Наряду с анализом динамических и статистических законов в книге уделено внимание ряду других вопросов, сопрягающихся с исследуемой проблемой. Затрагивается классификация современных физических теорий, проблема обоснования статистической механики, интерпретация квантовой механики, смысл и значение законов сохранения.

Табл. 1, рис. 20, библиогр. 107 назв.

Геннадий Яковлевич Мякишев

Динамические и статистические закономерности в физике
(Серия: «Философские проблемы естествознания»)

М., 1973 г., 272 стр. с илл.

Редактор *Н. А. Райская*

Техн. редактор *Г. А. Полонская*

Корректор *Е. В. Сидоркин*

Сдано в набор 20/XII 1972 г. Подписано к печати 28/III 1973 г. Бумага 84×108¹/₃₂.
Физ. печ. л. 8,5. Условн. печ. л. 14,28. Уч.-изд. л. 15,07. Тираж 7500 экз.
Т-05708. Цена книги 96 коп. Заказ № 1519

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва В-71, Ленинский проспект, 15.

2-я типография изд-ва «Наука», Москва Г-99, Шубинский пер., 10

М $\frac{0231-1742}{042(02)-73}$ 138-72

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Введение	5
§ 1. Значение проблемы соотношения между динамическими и статистическими закономерностями в физике	5
§ 2. Краткий обзор существующих точек зрения	10
§ 3. Метод исследования	14
Глава II. Исторический очерк возникновения и развития фундаментальных физических теорий	21
§ 1. Классическая механика	21
§ 2. Механика сплошных сред	25
§ 3. Классическая термодинамика	26
§ 4. Макроскопическая электродинамика	28
§ 5. Уравнения Максвелла — Лоренца для «элементарных» электромагнитных процессов	29
§ 6. Специальная теория относительности	30
§ 7. Общая теория относительности. Теория гравитации	33
§ 8. Статистическая механика	34
§ 9. Физическая кинетика	41
§ 10. Микроскопическая электродинамика	45
§ 11. Квантовая механика	52
§ 12. Квантовая статистика	57
§ 13. Возникновение релятивистской квантовой механики	60
§ 14. Квантовая электродинамика	66
§ 15. Слабые взаимодействия	76
§ 16. Сильные взаимодействия	83
§ 17. Современное состояние теории элементарных частиц и их взаимодействий	87
§ 18. Принципы симметрии и систематика элементарных частиц	93
Глава III. Два аспекта проблемы соотношения между динамическими и статистическими закономерностями	107
§ 1. Общая схема взаимосвязей фундаментальных физических теорий	107
§ 2. Формулировка двух аспектов проблемы соотношения динамических и статистических закономерностей	118

§ 3. Связь низших и высших форм движения материи и соотношение между динамическими и статистическими закономерностями	120
§ 4. Соотношение динамических и статистических законов, описывающих одну и ту же форму движения материи	140
Г л а в а IV. Динамические законы и границы их применимости	156
§ 1. Принцип наименьшего действия как принцип максимальной вероятности	156
§ 2. Классическая механика как статистическая теория	160
§ 3. Границы применимости динамических законов для систем с большим числом частиц	168
§ 4. Детерминизм Лапласа как выражение примата динамических законов	171
Г л а в а V. Статистические законы как наиболее глубокое выражение необходимых связей в природе . . .	174
§ 1. Диалектическая взаимосвязь необходимого и случайного в статистических закономерностях	174
§ 2. Динамические элементы в статистических закономерностях и законы сохранения	188
§ 3. Принцип неопределенности и статистический характер законов сохранения механических величин	192
§ 4. Статистическая природа фундаментальных физических закономерностей и специальная теория относительности	207
§ 5. Особая форма статистических корреляций в квантовой механике и законы сохранения	211
§ 6. Причинность в динамических и статистических законах	223
§ 7. Вероятность и причины статистического характера физических теорий	231
§ 8. О причинах недооценки роли и значения статистических законов	253
Г л а в а VI. Соотношение между динамическими и статистическими закономерностями и общие перспективы развития физики элементарных частиц	257
§ 1. Концепция уровней Боме и ее критика	257
§ 2. Возможна ли динамическая теория движения элементарных частиц?	261
§ 3. Статистические теории и познаваемость мира . . .	264
Г л а в а VII. Заключение	267
Литература	269

Г Л А В А ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Значение проблемы соотношения между динамическими и статистическими закономерностями в физике

Проблема соотношения между динамическими и статистическими закономерностями возникла одновременно с появлением в физике статистических законов. С тех пор она не переставала привлекать внимание как физиков, так и философов и в настоящее время является одной из наиболее актуальных философских проблем естествознания.

В соответствии с логикой развития науки подход к проблеме и даже ее постановка изменились с течением времени существеннейшим образом. Первоначально основным в проблеме соотношения динамических и статистических законов был вопрос об обосновании классической статистической механики на базе динамических законов Ньютона. Пытались выяснить, каким образом законы статистической механики, существенной чертой которой является вероятностный, неоднозначный характер утверждений, должны быть связаны с законами Ньютона, однозначно определяющими по заданному начальному состоянию все дальнейшее поведение системы. Вопрос этот и по сей день нельзя считать решенным, несмотря на большие успехи, достигнутые на этом пути.

В настоящее время, однако, наибольший интерес приобрела совсем другая постановка вопроса, противоположная в некотором отношении первоначальной. Это произошло после того, как выяснилось, что законы поведения объектов микромира, законы квантовой механики, имеют статистический характер. Является ли статисти-

ческое описание индивидуальных микроскопических процессов единственно возможным или же существуют динамические законы движения элементарных частиц, скрытые пока под покровом статистических законов квантовой механики?

Таким образом, если раньше основную проблему видели в том, чтобы показать, как статистические законы поведения большой совокупности объектов вырастают из динамических законов поведения отдельных ее элементов, то теперь предлагается выяснить, обязательно ли за известными статистическими законами скрываются определенные динамические законы или же они представляют собой вполне самостоятельный тип закономерности, не только не нуждающийся в обосновании, как полагали в конце XIX века, но и претендующий на более глубокое отражение объективных связей в природе, чем динамические законы.

Следует сказать, что как первоначальная, так и современная постановка проблемы соотношения между динамическими и статистическими закономерностями прямым образом связана с поисками направления развития физики. Стремление обосновать статистическую механику (или молекулярно-кинетическую теорию строения вещества, как тогда говорили) на базе классической механики Ньютона выражало в XIX веке наиболее прогрессивные тенденции развития науки и было связано с утверждением гипотезы об атомном строении вещества. Дело обстояло так: либо развивать только феноменологическую теорию тепловых процессов — термодинамику, основанную на понятии энергии, ее превращениях и передаче, — либо же попытаться понять, что разыгрывается за кулисами наблюдаемых превращений энергии.

В наше время проблема обоснования статистической механики давно утратила былую остроту. Никто не сомневается ни в реальности атомов, ни в том, что статистическая трактовка тепловых процессов глубже термодинамической. Если проблема и не получила полного решения, то это волнует не такое уж большое число исследователей. Это довольно глубокий тыл науки. Исчерпывающее решение проблемы, как предполагается, вряд ли затронет другие разделы физики.

Особую актуальность проблема соотношения между динамическими и статистическими закономерностями имеет сейчас в связи с безусловно актуальной необходимостью

стью построения теории элементарных частиц, выходящей за рамки существующей квантовой теории поля. Общий подход к построению теории непосредственно зависит от того, допускается ли, что статистический закон может достаточно полно отразить взаимосвязи в микромире, или же это невозможно и углубление наших знаний с неизбежностью приведет к открытию динамических законов.

В этом сейчас состоит важное значение проблемы соотношения динамических и статистических законов. Направление исследований в физике элементарных частиц в определенном смысле диктуется именно тем, как относиться к месту, роли и значению статистических законов в физике сравнительно с динамическими. Выбор «динамического» или «статистического пути» должен быть сделан независимо от того, занимается ли ученый специально анализом соотношения между законами различного типа и делает выбор на основе этого анализа или же интуитивно останавливается на определенной точке зрения.

Конечно, теснейшая связь вопроса о соотношении динамических и статистических законов с направлением развития физики не является исключительной привилегией именно данной философской проблемы современной физики. Примерно то же можно сказать и о проблеме пространства и времени, прерывности и непрерывности и т. д., хотя в этих проблемах и нет достаточно определенной постановки вопроса, сводящей решение к аргументированному выбору из двух или трех конкретных возможных решений. Проблема становится по-настоящему актуальной не столько потому, что ее нужно решить, сколько потому, что назрели условия, при которых ее можно решить.

Главное значение проблемы соотношения между динамическими и статистическими закономерностями, выдвигающее ее на первый план по сравнению с другими методологическими проблемами физики, состоит в том, что накопленный на протяжении всей истории развития физики богатейший материал в настоящее время, как нам представляется, поддается однозначному обобщению на основе философии диалектического материализма. Решение проблемы в общих чертах можно сформулировать вполне доказательным образом. Еще несколько десятков лет назад необходимые факты не были получены и нельзя было высказать ничего, кроме более или менее

правдоподобных догадок. Со многими методологическими проблемами дело обстоит сейчас именно так.

Значение исследуемой проблемы, однако, совершенно не исчерпывается соображениями практической полезности ее выводов при выборе направления развития теории элементарных частиц, о чем шла речь. Анализ соотношения между динамическими и статистическими закономерностями в физике является одной из центральных философских проблем, так как касается существа основных типов закономерностей этой науки. Именно сопоставление двух возможных типов законов позволяет вскрыть суть объективных связей в природе.

Методологический анализ сравнительного значения статистических и динамических законов позволяет объяснить ту замечательную тенденцию к увеличению роли статистических законов, которая особенно отчетливо наблюдается в современной физике. Вскрытие причин этого процесса — одна из важнейших сторон рассматриваемой проблемы.

Исследование соотношения динамических и статистических законов неразрывно связано с пониманием категорий необходимого и случайного. На основе этого исследования с наибольшей полнотой может быть раскрыта диалектика необходимого и случайного, пронизывающая процессы окружающей нас природы. Единство противоположных категорий необходимого и случайного, утверждаемое в философии диалектического материализма, в статистических закономерностях физики выступает непосредственно. В них мы можем проследить, так сказать, «механизм» связи необходимого и случайного, причем сама она представлена в строго количественной форме. Диалектика же связи, к примеру, прерывного и непрерывного хотя и установлена в фундаментальных законах квантовой механики, но физическая ее сущность остается неясной и вызывает дискуссии по сей день. Рассматриваемая проблема и в этом отношении выгодно отличается от других философских проблем физики.

Как динамические, так и статистические законы выражают необходимые связи в природе. Если оставить без внимания количественную сторону, главное различие между ними — различие в философском отношении — состоит в смысле, вкладываемом в понятие необходимости. В статистических законах она непосредственно выступает в диалектической связи со случайным, в динами-

ческих — как абсолютная противоположность случайного. Любые законы, касающиеся более сложных форм движения материи, чем формы движения, рассматриваемые в физике, можно разделить по характеру понимания в них необходимости на два типа: динамические и статистические.

Количественная формулировка законов не обязательна. Можно назвать статистическим любой закон, в котором необходимость выступает в тесной связи со случайным.

Проблема соотношения основных типов закономерностей в физике теснейшим образом связана с фундаментальной проблемой причинности. Именно анализ динамических и статистических законов позволяет рассмотреть те формы причинности, которые выступают в современной физике. Причинность — момент взаимосвязи и имеет прямое отношение к закону, охватывающему множество особенностей объективной взаимосвязи. Закон «выхватывает» целый «кусочек» взаимосвязи. То или иное решение проблемы причинности в настоящее время основывается на определенных представлениях о сущности динамических и статистических законов и их соотношении. Не случайно поэтому почти во всех главах сборника «Проблема причинности в современной физике» (Изд. АН СССР, 1960 г.) речь идет и о соотношении основных типов физических законов, несмотря на то, что этому вопросу посвящена специальная глава.

Ряд ученых связывал представление о первичности статистических законов с индетерминизмом, с отсутствием в природе причинности. Возникшее в 50-х годах движение за «причинную» интерпретацию квантовой механики имело в своей основе уверенность в том, что отказ от принятия динамических законов движения микрообъектов является отказом от причинности. Обсуждение относительного значения динамических и статистических законов имеет, таким образом, непосредственное отношение к интерпретации квантовой механики. Оно помогает выработать определенную точку зрения на причину статистического характера квантовой механики. Как известно, это — один из основных вопросов в интерпретации квантовой механики и он не решен однозначно до сих пор.

Анализ соотношения динамических и статистических законов интересен еще в одном аспекте, выходящем за

рамки данной проблемы. Он с большой наглядностью показывает необыкновенную инерцию мышления как при постановке, так и при решении философских проблем современного естествознания. Даже теперь все еще живучи те настроения, которые существовали при возникновении проблемы, когда главная и единственная задача состояла в обосновании законов статистической механики на основе динамических законов механики Ньютона.

§ 2. Краткий обзор существующих точек зрения

Проблему соотношения динамических и статистических законов в настоящее время ни в коей мере нельзя считать решенной. В литературе представлен полный спектр возможных точек зрения, причем нельзя сказать, что они существенным образом различаются в зависимости от того, придерживается ли ученый материалистических или идеалистических взглядов.

Статистические законы как новый тип законов были первоначально сформулированы на базе динамических уравнений классической механики. Поэтому длительное время динамические законы считались основным, первичным, типом закономерности, а статистические законы — производными от них.

Необходимость введения этих законов вначале рассматривалась в значительной мере как следствие ограниченности наших способностей к познанию. Невозможность проследить за изменением всех степеней свободы сложных систем вынуждает нас к некоторому осредненному, статистическому описанию.

Хотя со временем становилось все более и более очевидным, что статистические законы имеют полное право на существование как объективный вид закономерности, привычка считать динамические законы основополагающими укрепились очень глубоко.

Как уже говорилось, первоначально основную проблему видели в том, чтобы выявить соотношение статистических законов поведения совокупности частиц и динамических законов поведения отдельных ее членов. Не обращали внимания на обстоятельство немаловажного значения для всей проблемы. Ведь статистическая механика вначале формулировалась как механическая теория тепла, т. е. как теория, которая должна была трак-

говать те же явления, что и термодинамика — теория сугубо динамическая. Следовательно, возник еще один аспект проблемы связи статистических и динамических законов: связи статистической механики и термодинамики — теорий, трактующих один и тот же круг явлений, одну и ту же форму существования материи. Впоследствии именно этот аспект, радикальным образом отличающийся от первого, приобрел исключительно важное значение для исследуемой проблемы.

Нет сомнения, что на первом этапе среди физиков не могло быть точки зрения, отличной от признания примата динамических законов. На протяжении полувека эти представления, казалось, укреплялись. Хотя статистические законы приобретали все большее и большее значение, вторгаясь в новые области (учение об электромагнетизме, механика сплошных сред), на них продолжали смотреть как на некую надстройку над фундаментальными принципами классической механики и, позднее, классической теории поля Максвелла — Лоренца. Считалось, что только динамические законы полностью отражают причинность в природе.

Эти представления о выражении причинности в фундаментальных законах природы, унаследованные от прошлого, проявляют себя и сейчас прежде всего в терминологии, которая всегда оказывается весьма устойчивой и часто продолжает применяться после решительного изменения содержания употребляемых терминов, что нередко мешает пониманию существа дела. Вместо совершенно корректных понятий «динамические» и «статистические» законы иногда употребляют термины «причинная» и «случайная» закономерности. Именно так, например, поступает Бом [1], стр. 8), против чего справедливо возражают Акчурина и Сачков в рецензии на его книгу [2].

Аналогичные термины «детерминистский» и «вероятностный» законы применяет Фок [3], а также Демков и Лошак [4] и др.

Возникновение и развитие квантовой теории постепенно привело к пересмотру представлений о соотношении динамических и статистических законов. Это произошло в связи с тем, что неожиданно для самих ученых, создавших квантовую механику, был обнаружен статистический характер ее законов, статистический характер поведения отдельных элементарных частиц — простейших известных сегодня образований микромира.

Поэтому не только крупнейшими учеными, такими, как Бор, Гейзенберг, Борн и др., но и таким выдающимся ученым и последовательным материалистом, как Ланжевен [5], был выдвинут тезис о первичности статистических законов.

Принятие этого тезиса большинством ученых-материалистов с самого начала было затруднено тем, что Бор, Гейзенберг и некоторые другие связывали положение о первичности статистических законов с индетерминизмом, с отсутствием в природе причинности. Принципиально статистический характер законов микромира означал, по их мнению, недостижимость для него привычного идеала причинности. Естественно, прямо сформулированный вывод об отсутствии причинности вызвал резкие возражения как со стороны крупных ученых старшего поколения (Эйнштейн, Планк, Шредингер и др.), не всегда придерживавшихся четкой философской позиции, так и со стороны ученых-материалистов. Сущность возражений этих ученых заключалась в том, что они настаивали на необходимости отыскания динамических законов в микромире, воспринимая статистические законы квантовой механики как промежуточный этап, позволяющий описывать поведение совокупности микрообъектов, но не дающий еще возможности точно описать поведение отдельных микрообъектов.

В нашей стране весьма активно и последовательно отстаивал данную точку зрения Терлецкий. По его мнению, «элементарные законы, по самой своей сути, должны отображать все движение полностью и не могут содержать в себе неизвестных, случайных элементов...» [6]. Соответственно законы квантовой механики не элементарны и за ними должны скрываться элементарные динамические законы.

Большой всплеск движения за «причинную» интерпретацию квантовой механики в противовес обычной статистической возник в начале 50-х годов. Наиболее энергичным проводником этой системы взглядов стал Бом, получивший поддержку де Бройля.

Однако статистический характер поведения микрообъектов с полной очевидностью вытекает из всей совокупности известных фактов. Именно статистические представления в точности соответствуют эмпирической ситуации в атомной и ядерной физике, где все эксперименты существенным образом основаны на подсчете событий.

Поэтому развитие «причинной» интерпретации Бомом, Вижье и др. привело их, по существу, к отказу от доминирующей роли динамических законов. Особенно показательна в этом отношении книга Бома [1], возникшая в результате его работ по интерпретации квантовой механики. Он признает в ней, что нужно рассматривать динамические и статистические законы (у него другая терминология) «как, в сущности, дополняющие друг друга различные точки зрения на любой данный естественный процесс, такие, что иногда для схватывания существенного нам нужна то одна, то другая точка зрения, а временами мы должны соответствующим образом сочетать обе точки зрения» ([1], стр. 207). Здесь можно даже усмотреть влияние боровской идеи дополнительности, распространяемой на соотношение динамических и статистических законов.

Редактор перевода книги Бома Терлецкий считает, что, развивая положения «о взаимосвязи причинных и случайных закономерностей и т. д., Бом фактически излагает некоторые основные положения диалектического материализма» (см. [1], стр. 8).

На первый взгляд данная идея кажется заманчивой и действительно соответствующей диалектическому материализму, ибо она подчеркивает единство противоположностей в объективных взаимодействиях. Омеляновский, например, так прямо и говорил: «Динамическая и статистическая закономерности — формы необходимого, существенного отношения явлений природы — не только связаны с переходами одна в другую, но едины в противоположности» ([7], стр. 394). По его мнению, признание первичности динамических законов «так же неверно, как признание первичности статистических законов» ([7], стр. 405).

Можно считать, таким образом, что в настоящее время большая часть ученых отказалась от представлений о первичности динамических законов.

Против представления об основной роли статистических законов, которое возникло после появления квантовой механики, была выдвинута теория «равноправия» динамических и статистических законов. Они рассматриваются как законы, относящиеся, вообще говоря, к различным явлениям, имеющие каждый свою сферу применения, не сводимые друг к другу, но способные друг друга дополнять.

Однако данная точка зрения не учитывает целый ряд моментов. Прежде всего, она не объясняет, почему статистические закономерности получают все большее и большее распространение как в физике, так и в других науках. Кроме того, она игнорирует тот фундаментальный факт, что все статистические теории современной физики (квантовая механика, квантовая электродинамика, статистическая термодинамика и т. д.) содержат в качестве приближения соответствующие динамические теории. Нельзя указать ни одного круга явлений, который бы более полно описывался динамической теорией, чем соответствующей статистической.

Поэтому естественно, что не мало сторонников имеет сейчас точка зрения, рассматривающая статистические законы как наиболее глубокую, наиболее общую форму закономерности. Так, например, Фок в статье «Об интерпретации квантовой механики» пишет: «Навязывать природе именно детерминистскую форму закономерностей, отказываясь, наперекор очевидности, признать более общую вероятностную их форму,— значит исходить из каких-то догматов, а не свойств самой природы» [3]. Подобная же мысль содержится в статье Вонсовского и Курсанова «О связи динамических и статистических закономерностей в атомных явлениях» [8].

Рассматривая весьма быструю эволюцию взглядов на соотношение динамических и статистических законов, можно прийти к мысли, что представление о равноправии динамических и статистических законов является переходным от представлений о первичной роли динамических законов к представлению о статистических законах как наиболее полно отражающих взаимосвязи природы.

Две первые точки зрения весьма обстоятельно изложены в цитированных выше книгах Терлецкого и Бома. Попытка же всестороннего обоснования последней точки зрения об основополагающей роли статистических законов с материалистических позиций делается в этой книге.

§ 3. Метод исследования

При изучении рассматриваемой нами сложной, в большой степени дискуссионной проблемы очень существенным, может быть даже самым существенным, является правильный выбор метода исследования.

Прежде всего, метод должен обеспечить достаточно объективный подход к изучаемой проблеме. Не следует с самого начала брать за основу какое-либо истолкование существа исследуемых закономерностей, всегда в той или иной мере неполное и одностороннее. Нельзя также при решении столь важной и многосторонней проблемы, как соотношение между динамическими и статистическими закономерностями, исходить из попыток истолкования понятия вероятности, тесно связанного со статистическими законами, выражаемыми на математическом языке теории вероятностей. Скорее само понятие вероятности следует интерпретировать на основе того соотношения между законами, которое существует в действительности.

Метод исследования должен быть в принципе таким же, как и при изучении любой естественнонаучной проблемы. Имеется объект исследования — физические законы, динамические и статистические. При изучении соотношения между ними необходимо в первую очередь проанализировать ту связь между имеющимися в физике законами, которая реально сложилась в настоящее время. Очень важно при этом проследить исторически смену теорий, трактующих один и тот же круг явлений, одну и ту же форму существования материи. Именно таким образом можно совершенно отчетливо установить тенденцию в развитии относительной роли статистических и динамических законов в физике. Здесь же мы найдем факты, необходимые для объяснения этой тенденции. Такая постановка вопроса обеспечивает объективный подход к проблеме, при котором ни один из ее аспектов не выпадает с самого начала из поля зрения.

В отличие от обычного для естественных наук объекта исследования — окружающего нас материального мира, при методологическом анализе проблем объектом исследования становится не сама природа непосредственно, а те физические законы, которые отражают присущие ей взаимосвязи. Ведь философия — это не особый род науки, контактирующей с самой природой, а осмысливание тех общих взаимосвязей, которые открыты различными конкретными науками.

Не нужно пытаться анализировать все громадное многообразие законов, накопленных физикой за много веков ее существования. Следует выделить лишь фундаментальные физические теории, т. е. совокупность основных для данной ступени развития науки законов, не

сводимых к более общим положениям. Таких фундаментальных теорий, описывающих огромное количество процессов, относящихся к определенным формам движения материи, сравнительно немного: классическая механика Ньютона, термодинамика, классическая статистическая механика, макроскопическая электродинамика Максвелла, квантовая механика и т. д. Эти теории содержат в себе в концентрированном виде все наши знания о физических закономерностях. Несмотря на тесные связи между ними, они достаточно отчетливо обособлены друг от друга либо предметом исследования, либо методом.

Закономерности в фундаментальных физических теориях совершенно определенным образом делятся на динамические и статистические по весьма объективному критерию: для статистических теорий характерно вероятностное описание явлений. Обычно это деление споров не вызывает. Точно так же вполне однозначно можно выделить именно фундаментальные теории. В физике уже имеется готовая схема, и менять ее (во всяком случае в начале исследования) нет никакой нужды. Эта схема неплохо отражена в курсах теоретической физики. Правда, и здесь могут встретиться особые точки зрения. Так, Омеляновский считает, что, в отличие от классической статистической физики, в квантовых «законах нераздельно сочетаются статистическая и динамическая стороны закономерности атомных явлений» ([7], стр. 384). Однако с подобными суждениями трудно согласиться. В действительности, как подробнее будет сказано впоследствии, динамические элементы присутствуют в любой статистической закономерности.

Следует, далее, отметить, что в начале исследования должна быть проведена соответствующая классификация изучаемых объектов. Довольно неожиданно выяснилось, что, несмотря на большое количество работ по интересующей нас проблеме, на классификацию не обращалось должного внимания. Классифицировать, разумеется, нужно не сами законы по признаку их динамического или статистического характера. Это уже сделано в физике. Классифицировать нужно реально существующие в физике связи между динамическими и статистическими законами. При этом вскрывается основной, по нашему мнению, момент, который длительное время оставался незамеченным, а именно наличие двух совершенно различных аспектов соотношения статистических за-

конов и динамических. Первый — это соотношение между статистическими законами поведения совокупности объектов и динамическими законами поведения отдельных индивидуумов этой совокупности и второй — соотношение динамических и статистических законов, описывающих определенный круг явлений, определенную форму движения материи [9]. То, что в явной форме эти аспекты обычно не различают, с самого начала ведет к сильной путанице, к отсутствию объективного освещения различных сторон проблемы, к необоснованной концентрации внимания на отдельных частностях. Положение усугубляется тем, что первый аспект, который исторически сложился раньше и долго был единственным, приковывает всеобщее внимание в силу традиции, тогда как с развитием науки объективно большее значение приобрел второй аспект и по сравнению с ним первый имеет частное значение. По сути дела, первый аспект непосредственно связан с проблемой соотношения высших и низших форм движения материи, а не с проблемой соотношения динамических и статистических закономерностей.

Выделение двух аспектов исследуемой проблемы и анализ вытекающих отсюда следствий является основным в нашей работе.

Состояние науки сейчас таково, что мы можем пойти гораздо дальше простой классификации. Можно вскрыть то существенное (в самом общем философском смысле), что отличает динамические законы от статистических, и оценить их сравнительное значение в качестве средств более или менее полного отражения объективных связей в природе.

Может показаться, что сделанные замечания относительно метода исследования достаточно очевидны и нет нужды подробно на них останавливаться. Однако, как показывает знакомство с соответствующей литературой, это не так.

Если не посмотреть внимательно, каково же соотношение статистических и динамических законов на самом деле, т. е. в современной физике, то можно с самого начала направить исследование по неправильному руслу. В результате дело сводится либо к неким частностям, из которых делают потом общие выводы, либо исследователь настолько гипнотизирует себя первоначальной идеей, кажущейся естественной, что перестает воспринимать факты реально существующего соотношения законов.

Подводных камней, на которые может натолкнуться исследование, здесь немало.

Так, Терлецкий в цитированной выше монографии [6] взял сразу за основу соотношение классической механики и статистики и занялся в дальнейшем, по существу, обоснованием классической статистической механики. Получилось интересное исследование, но проблема соотношения динамических и статистических закономерностей в целом фактически не решалась.

В главе «Соотношение динамических и статистических закономерностей в физике» цитированного выше сборника [7] главная проблема усматривается в обосновании статистических закономерностей. Такой подход в известной мере предрешает исход дела в пользу динамических законов. А ведь в действительности еще не ясно, что нужно обосновать: статистические закономерности или динамические.

Бом увлекся концепцией уровней, согласно которой, грубо говоря, за каждым статистическим законом лежит динамический, а за динамическим на новом уровне — в свою очередь статистический и т. д., так что иерархия законов представляет собой нечто вроде слоеного пирога. Многим кажется привлекательной идея о том, что наличие динамических и статистических закономерностей отражает единство противоположностей. Это мешает видеть тот бесспорный факт, что любому динамическому закону современной физики соответствует статистический закон, более глубоко описывающий те же явления, но не наоборот.

Иногда сразу даются такие определения динамических и статистических законов, которые, несмотря на свою кажущуюся естественность, противоречат как реальному содержанию статистических законов физики, так и диалектико-материалистическому пониманию закона как выражения существенных, необходимых, связей в природе. Вот, например: «Закономерность, согласно которой некоторые события A являются необходимыми по отношению к данному комплексу условий S , называется динамической... Закономерность, согласно которой некоторые события A являются вероятно-случайными по отношению к данному комплексу условий S , называется статистической или вероятностной» [10]. Но ведь, к примеру, распределение молекул по скоростям Максвелла (событие A в данной тер-

минологии) является необходимым при термодинамическом равновесии (комплекс условий S) и должно быть названо в рамках приведенных определений динамическим законом. В действительности же, как известно, закон распределения Максвелла — это первый пример вошедшего в науку статистического закона. Точно так же каноническое распределение Гиббса — важнейший закон статистической физики равновесных состояний — является необходимым для систем в термостате, хотя безусловно относится к статистическим законам.

Статистический характер имеет и второе начало термодинамики. Тем не менее процессы в природе с необходимостью носят необратимый характер. Число подобных примеров можно увеличивать практически неограниченно.

Для всех перечисленных выше примеров характерен формальный подход к исследованию, давно уже чуждый естественным наукам, но сохранившийся при анализе философских проблем. На таком пути возникает реальная опасность очутиться в плену старых догматических представлений и просмотреть то новое, что уже играет в науке определяющую роль. Ведь ученый начинает исследование, уже усвоив представления, которые были сформулированы на основе предыдущего состояния науки. Главная трудность состоит в том, чтобы удержаться от искушения во что бы то ни стало приспособить к старым представлениям новые факты, вместо того чтобы сразу взять эти факты за основу и посмотреть, не следует ли всю проблему ставить совершенно по-новому.

Уместно здесь, может быть, напомнить поучительную историю создания специальной теории относительности А. Эйнштейном. До Эйнштейна ученые безуспешно пытались согласовать новые факты (опыты Майкельсона, Трутона и Нобла и т. д.) со старыми представлениями. Эйнштейн же нашел гениально простой выход из всех трудностей. Он взял за основу новые факты и сразу же получил теорию, освещающую с совершенно иной точки зрения то, что уже было известно, и, сверх того, содержащую огромные возможности для предсказания новых явлений.

Правда, нельзя при обнаружении любого нового факта сразу же пытаться перестраивать теорию заново. Сначала нужно убедиться, что этот факт действительно нельзя согласовать с существующими представлениями. Подав-

ляющая часть новых экспериментальных фактов объясняется существующими теориями. Фундаментальные открытия не так уж часты. Наряду с революционностью, присущей настоящей науке, ей же свойственна тенденция к сохранению своих положений, определенный консерватизм, без которого она не могла бы существовать.

Здесь следует сделать одно методическое замечание. Часто наряду с утверждениями, которые можно серьезно обосновать, тот или иной автор приводит мысли, вообще недоказуемые в настоящее время, и никакого ясного разграничения между теми и другими не делает, что сильно дискредитирует исследование. Нужно особо выделить положения, по поводу которых ничего, кроме собственного мнения и некоторых аргументов, высказать нельзя.

Наконец, последнее замечание. При рассмотрении сложных дискуссионных проблем, по которым не выработана единая точка зрения, нельзя ограничиваться изложением только общей системы взглядов, которой придерживается сам автор. Обязателен разбор других представлений. Одного упоминания, как это часто делается, других точек зрения недостаточно. Отказ от критического анализа существующих взглядов ослабляет доказательность развиваемых представлений и делает исследование существенно неполным.

Г Л А В А II

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ

§ 1. Классическая механика

Классическая механика, построение которой было завершено Ньютоном во второй половине XVII века,— это первая фундаментальная физическая теория, охватывающая громадный круг явлений. До механики Ньютона было известно множество законов большей или меньшей общности, но теории, охватывающей всевозможные случаи движения любых тел, не существовало.

При создании классической механики впервые был воплощен идеал научной теории, существующий и поныне. Еще до Ньютона он был сформулирован рядом философов, в первую очередь Бэконом. Если длительное время задачу объяснения естественного хода процессов в природе видели в том, чтобы свести новые, непривычные явления к таким непосредственно очевидным, как удар, прикосновение и т. д., то с появлением механики Ньютона стало с полной очевидностью и бесспорно понятно, что *задача науки состоит в отыскании наиболее общих, количественно формулируемых законов природы*. Действием таких законов нужно объяснять все явления, и в частности те, которые настолько привычны, что, казалось бы, не нуждаются в объяснении. В фундаментальных законах главное — их общность и точная математическая формулировка, а совсем не наглядность и самоочевидность.

Механика Ньютона в высокой степени удовлетворяла этим требованиям. С самого начала она претендовала на описание движения, т. е. перемещения в пространстве

с течением времени любых материальных тел или частей тел друг относительно друга.

Непосредственно законы механики, сформулированные Ньютоном, относятся к телу, размерами которого можно пренебречь, — к материальной точке. Однако любое тело макроскопических размеров всегда можно рассматривать как совокупность материальных точек и, следовательно, достаточно точно описать его движения. В современной физике под классической механикой обычно понимают механику материальной точки, системы материальных точек (для краткости мы будем говорить: частиц) и механику абсолютно твердого тела. Именно это мы будем иметь в виду в дальнейшем, говоря о классической механике.

В классической механике состояние любой системы однозначно определяется координатами частиц системы и их скоростями. Динамические свойства частиц характеризует одна-единственная величина — инертная масса, которая считается неизменной. Вместо скоростей тел в качестве переменных, определяющих состояние системы, можно выбрать импульсы — произведения массы на скорость.

Состояние системы *однозначно* определяется координатами и скоростями частиц, так как, зная их, мы можем найти любую другую механическую величину в данный момент времени: энергию, момент импульса и т. д. *Главное же состоит в том, что по координатам и скоростям частиц системы в данный момент времени, зная действующие между частицами силы, можно однозначно определить координаты и скорости частиц в любой последующий или предшествующий момент времени* (считая, разумеется, систему замкнутой; иначе нужно еще знать внешние силы).

Таким образом, в механике Ньютона устанавливается однозначная связь состояний системы, причем само состояние считается точно определенным координатами и скоростями частиц (или тел) системы.

Закономерность, в которой зависимости всех физических величин, входящих в теорию, однозначны, была названа динамической.

Поскольку идеалом науки всегда было максимально полное и точное знание процессов, происходящих в природе, ученые стремились к построению теорий, дающих, по крайней мере в принципе, такого рода знания. Клас-

сическая механика полностью, как казалось, удовлетворяла этому идеалу, и в динамической форме ее законов видели естественное отображение фундаментальных связей природы.

После успехов классической механики в первую очередь в астрономии, где удалось с замечательной точностью вычислить движения планет и комет нашей солнечной системы, объяснить приливы и отливы в океане и даже по небольшой аномалии в движении Урана предсказать существование новой планеты — Нептуна, уверенность в незыблемости основных законов механики стала всеобщей. Им подчинялось движение всех тел: от гигантских планет до мельчайших пылинок.

Самим Ньютоном законы механики были сформулированы в форме, которую можно назвать векторной. Все величины, с которыми имеет дело теория — перемещения, скорости, силы, — рассматриваются как векторы. В дальнейшем на протяжении примерно 150 лет благодаря трудам великих ученых XVIII и XIX столетий Эйлера, Лагранжа, Лапласа и особенно Гамильтона были полностью выявлены все физические и математические следствия теории Ньютона. Были найдены все возможные формулировки основных принципов классической механики, и им была придана исключительно общая и изящная математическая форма.

В аналитической механике Лагранжа основными величинами являются скаляры: обобщенные координаты и обобщенные скорости, рассматриваемые как независимые переменные. Число обобщенных координат и, соответственно, скоростей равно числу степеней свободы системы. В методе Гамильтона основные переменные — это обобщенные координаты и обобщенные импульсы. Характерно, что в методах Лагранжа и Гамильтона взаимодействие характеризуется не силами, а энергией. Основная характеристика системы в методе Лагранжа — функция Лагранжа L для консервативных систем — представляет собой разность кинетической и потенциальной энергий. В методе Гамильтона характеристикой системы служит функция Гамильтона H . Во всех практически важных случаях она равна энергии системы E , выраженной через обобщенные координаты и импульсы *).

*) Необходимым условием равенства H и E является консервативность системы и использование инерциальных систем координат.

В рамках самой механики эти разные методы эквивалентны. В частности, открытие новых формулировок механики ни в малейшей степени не затрагивает динамического характера ее законов. При решении простых задач применять аналитические методы не имеет никакого смысла, так как обычная ньютоновская форма законов наиболее наглядна и быстрее всего приводит к цели. Но аналитические методы глубже проникают в структуру механики. Особое значение имеет формализм Гамильтона.

Равноправие координат и импульсов как независимых переменных дает большую свободу для выбора величин, принимаемых за «координаты», либо за «импульсы». В результате получается весьма абстрактная формулировка механики, играющая главную роль в построении классической статистической механики и имеющая наиболее прямой контакт с обычной квантовой механикой. Уравнение Гамильтона — Якоби для функции действия, зависящей от координат и времени, является прямым аналогом основного уравнения квантовой механики — уравнения Шредингера.

Наиболее лаконично основные положения механики можно сформулировать с помощью так называемых вариационных принципов. Основное значение имеет принцип наименьшего действия в форме Гамильтона. Согласно этому принципу из всех кинематически возможных перемещений системы из одного состояния в другое за время $t - t_0$ реализуется лишь то, для которого величина S , именуемая действием, принимает экстремальное (обычно минимальное) значение. Вариация действия $\delta S = 0$.

Само действие за промежуток времени от t_0 до t выражается через функцию Лагранжа L : $S = \int_{t_0}^t L dt$. Из требования $\delta S = 0$ вытекают уравнения Лагранжа, являющиеся уравнениями движения.

Принцип наименьшего действия обладает огромной общностью. Он справедлив для механики сплошных сред и может быть применен к немеханическим системам: электромагнитному полю, квантованным полям любой природы. Выбор функции Лагранжа целиком определяет форму теории, если при ее построении исходить из принципа наименьшего действия. Функция Лагранжа выражается через компоненты поля и удовлетворяет обобщенным уравнениям Лагранжа.

§ 2. Механика сплошных сред

Параллельно с развитием механики частиц и твердых тел шло развитие механики сплошных сред, т. е. механики жидкостей, газов и деформируемых твердых тел. Трудami Бернулли, Эйлера и других ученых в первой половине XVIII века были заложены основы гидродинамики идеальной жидкости *). Уравнение Эйлера, описывающее движение жидкостей и газов в случае, когда вязкостью и теплопроводностью можно пренебречь, и в настоящее время служит одним из основных уравнений гидродинамики. Его можно вывести из законов Ньютона для материальных точек. Вместе с уравнением непрерывности, выражающим закон сохранения вещества в гидродинамике, уравнение Эйлера позволяет решать любые задачи динамики идеальной жидкости.

Газы, жидкости и твердые тела (упругие и пластичные) в механике сплошных сред рассматриваются как непрерывные. Уравнения механики сплошных сред обычно относят не к данной частице или телу определенной массы, перемещающимся в пространстве с течением времени, а к массе в единице объема в данной точке пространства. Вместо набора координат и импульсов частиц состояние системы характеризуется некоторыми функциями, описывающими распределение различных физических величин в пространстве: плотностью $\rho(x, y, z, t)$, давлением $p(x, y, z, t)$ и скоростью $\mathbf{v}(x, y, z, t)$. Значения величин ρ , p , \mathbf{v} относятся не к определенной частице жидкости, а к данной точке пространства x, y, z в момент времени t **). Соответственно для решения гидродинамических задач следует задавать не конечное число начальных значений координат и импульсов (или скоростей), а начальные и граничные условия для непрерывных функций координат и времени, характеризующих состояние среды.

Однако, несмотря на существенное изменение как физического смысла самих переменных, рассматриваемых в теории, так и вида уравнений, динамический характер

*) Под гидродинамикой обычно понимают законы движения как жидкостей, так и газов.

**) Это так называемые переменные Эйлера, преимущественно используемые в гидродинамике. В уравнениях гидродинамики в форме Лагранжа x, y, z являются координатами жидкой частицы в момент времени t (переменные Лагранжа).

законов в механике сплошных сред остается незыблемым. Функции ρ , p , \mathbf{v} однозначно определяют состояние системы в данный момент времени, а уравнения гидродинамики позволяют установить значение этих функций в любой последующий момент времени, если они известны в начальный момент. Однозначный характер зависимостей между физическими величинами, рассматриваемыми в теории, здесь налицо. Как указывалось выше, это основное свойство динамических законов.

То же можно сказать и о теории упругости, основные уравнения которой были установлены в начале XIX века Навье и Коши.

В XIX веке начала развиваться гидродинамика неидеальной, вязкой, жидкости. Дело в том, что внутри движущейся жидкости (или газа) возникают силы трения, пренебречь которыми в общем случае нельзя. Кроме того, между отдельными участками движущейся среды существует теплообмен. В результате этих процессов происходит диссипация энергии, не учитываемая в уравнениях идеальной жидкости. Механика сплошных сред перестает быть чистой механикой. Процессы немеханической природы, тепловые процессы, могут стать существенными. Поэтому замкнутую систему уравнений, описывающую в принципе поведение сплошной среды в общем случае, нельзя построить на базе одной механики Ньютона. Лишь после создания теории тепла (термодинамики) такая система уравнений была построена.

§ 3. Классическая термодинамика

Классическая термодинамика родилась в борьбе с теорией теплорода, в которой теплота рассматривалась как особого рода неуничтожимая невесомая жидкость, способная перетекать от нагретых тел к холодным. Эта борьба продолжалась до середины XIX века, когда Майером, Джоулем и Гельмгольцем был установлен закон сохранения и превращения энергии. Выяснилось, что передача тепла — это не передача порции особой жидкости, а лишь особая форма передачи энергии от одного тела к другому, при которой не совершается макроскопическая механическая работа.

Закон сохранения энергии стал основным законом новой теории тепла, получив в ней название первого начала термодинамики. Этот закон явился следствием обоб-

щения громадной совокупности опытных фактов: невозможности построения вечного двигателя, существования механического эквивалента тепла и т. д.

Еще до открытия закона сохранения энергии Карно, исследуя работу тепловых машин, получил результаты, послужившие основой для формулировки другого фундаментального закона — второго начала термодинамики. Этот закон, высказанный вполне отчетливо Томсоном и Клаузиусом, представляет собой обобщение опытных фактов, касающихся необратимости процессов природы. Он указывает направление возможных энергетических превращений.

Все содержание термодинамики является в основном непосредственным следствием двух начал. Они вводят в теорию две однозначные функции состояния: внутреннюю энергию U и энтропию S . В замкнутых системах внутренняя энергия всегда остается неизменной, а энтропия сохраняется только при равновесных обратимых процессах. При необратимых процессах она возрастает, и ее рост наиболее полно отражает определенную направленность процессов природы.

Состояние в термодинамике определяется совсем иначе, чем в механике. Основными величинами, задающими состояние системы (они называются термодинамическими параметрами), являются в простейшем случае давление, объем и температура. Если первые параметры имеют механический смысл, то последний его лишен. Между параметрами существует связь, даваемая уравнением состояния, которое нельзя найти теоретически, и оно устанавливается опытным путем.

Сформулированная в конце XIX века Нернстом тепловая теорема, или третье начало термодинамики, не имеет столь большого значения, как первые два закона. Она не вводит новых термодинамических функций, но делает энтропию численно определенной. Второе начало позволяет найти энтропию с точностью до произвольной постоянной.

Термодинамика с течением времени превратилась в стройную и изящную теорию. Была получена возможность анализировать самые разнообразные системы в состоянии теплового равновесия и равновесные, т. е. обратимые, процессы. Гиббс разработал метод термодинамических потенциалов, в котором в зависимости от рода исследуемой проблемы состояние системы характе-

ризуется той или иной функцией: внутренней энергией, энтальпией, свободной энергией или термодинамическим потенциалом.

В классической термодинамике изучается состояние теплового равновесия и равновесные процессы. Для необратимых процессов она дает лишь неравенства, позволяющие указать возможные направления таких процессов. Впоследствии была построена и термодинамика необратимых процессов, на которой мы остановимся позже.

Победное шествие динамических теорий, начатое механикой Ньютона, продолжалось. Термодинамика — бесспорно динамическая теория, так как устанавливаемые ею связи носят однозначный характер. По заданным значениям (точным, а не вероятностным) одних величин определяются все остальные.

Явления, описываемые динамическими законами теории тепла, трактуются ими как абсолютно необходимые. Как и в механике, случайное не входит в теорию.

§ 4. Макроскопическая электродинамика

Следующим и одним из самых важных этапов развития динамических теорий было создание электродинамики. Во второй половине XIX века длительный процесс развития учения об электромагнитных явлениях был завершен Максвеллом, написавшим уравнения для электромагнитного поля, охватывающие все известные в то время факты с единой точки зрения и позволяющие предсказывать новые замечательные явления. Наряду с механической и тепловой формами движения материи была открыта и исследована новая, электромагнитная, форма.

Теорию Максвелла часто называют макроскопической электродинамикой. В ней точно так же, как и в механике сплошных сред, все величины, в частности заряды и токи, рассматриваются как непрерывные. Дискретность в строении электричества не учитывается.

Электромагнитное поле в теории Максвелла характеризуется посредством четырех векторов: напряженности электрического поля \mathbf{E} , электрической индукции \mathbf{D} , напряженности магнитного поля \mathbf{H} и магнитной индукции \mathbf{B} . Эти векторы являются функциями координат и времени подобно давлению, плотности и скорости в гидродинамике. Электромагнитные свойства вещества задаются в теории тремя величинами (в общем

случае тензорными): диэлектрической проницаемостью ϵ , магнитной проницаемостью μ и электропроводностью σ , которые должны быть определены экспериментально.

Для векторов $\mathbf{E}(x, y, z, t)$, $\mathbf{D}(x, y, z, t)$, $\mathbf{H}(x, y, z, t)$, $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ записывается система линейных дифференциальных уравнений в частных производных, позволяющая по точно заданным начальным значениям полей внутри некоторого объема и по граничным условиям на поверхности этого объема для тангенциальной составляющей либо \mathbf{E} , либо \mathbf{H} определить величину электромагнитного поля в любой последующий момент времени.

Характеристики поля \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{H} и \mathbf{B} связаны друг с другом так называемыми материальными уравнениями, в простейших случаях алгебраическими: $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$. Еще одним материальным уравнением является закон Ома в дифференциальной форме.

Важнейшим результатом теории Максвелла было доказательство конечности скорости распространения электромагнитных взаимодействий. Было также показано, что свет имеет электромагнитную природу, и тем самым вся оптика стала одним из разделов учения об электромагнитных явлениях.

Однако все принципиально новые открытия, которые были сделаны при построении электродинамики, не внесли каких-либо изменений в представления о динамическом характере законов природы. Однозначные связи всех входящих в теорию величин и принципиальная возможность точного определения последних не оставляют никаких сомнений в том, что теория Максвелла является динамической.

§ 5. Уравнения Максвелла — Лоренца для «элементарных» электромагнитных процессов

В самом конце XIX века основатель электронной теории строения вещества — Лоренц сформулировал уравнения, описывающие микроскопические электромагнитные процессы. Эти уравнения, называемые обычно уравнениями Максвелла — Лоренца, были постулированы Лоренцем на основе уравнений Максвелла и определенных представлений о веществе как совокупности электрически заряженных частиц. По форме уравнения Максвелла — Лоренца аналогичны уравнениям Максвелла,

но электромагнитное поле характеризуется в них двумя векторами: истинным (точным, а не усредненным) значением напряженности электрического поля \mathbf{e} и истинным значением магнитного поля \mathbf{h} . Принимается, что эти векторы имеют определенное значение в любой точке пространства, в том числе и внутри заряженных элементарных частиц, и поля создаются всеми зарядами, действие которых в данной точке существенно.

Уравнения Максвелла — Лоренца описывают «элементарные» электромагнитные процессы: они связывают движение отдельных заряженных частиц с создаваемым ими электромагнитным полем и имеют динамический характер, так же как и уравнения Максвелла.

§ 6. Специальная теория относительности

В начале XX века развитие электродинамики трудами Лоренца, Пуанкаре и, главным образом, Эйнштейна привело к созданию специальной теории относительности. При исследовании электромагнитных процессов было обнаружено, что электродинамика требует коренного пересмотра наших представлений о пространстве и времени, — представлений, имеющих свою физическую основу в законах классической механики.

Если предположить, что принцип относительности Галилея, согласно которому механические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета, справедлив и для электромагнитных явлений, то уравнения Максвелла и Максвелла — Лоренца не должны изменять свою форму при переходе от одной инерциальной системы координат к другой. Они инвариантны относительно преобразований координат и времени. Однако оказалось, что это справедливо лишь в том случае, когда преобразования координат и времени существенно отличны от преобразований, принятых в механике Ньютона.

Физические представления о пространстве и времени формулируются именно в виде преобразований координат и времени при переходе от одной системы отсчета к другой. Соответственно классические преобразования Галилея должны быть заменены релятивистскими преобразованиями Лоренца, которые переходят в классические лишь при скоростях движения, много меньших скорости света.

Справедливость преобразований Лоренца не ограничена рамками электромагнитных процессов. Просто они были открыты при исследовании электромагнитных явлений. Ведь электромагнитные процессы связаны с большими скоростями распространения взаимодействий и теория электромагнитного поля не могла не содержать релятивистских представлений о пространстве и времени (либо в явной, либо в скрытой форме).

Теория относительности — это физическая теория пространства и времени, охватывающая процессы любой природы. С ее созданием раз и навсегда было покончено с независимостью геометрии реального мира от физики. Геометрия была поставлена на физические рельсы.

Теорию относительности нельзя назвать теорией, описывающей определенную форму движения материи, как все предыдущие фундаментальные теории. Это теория не объектов, а общей структуры пространства и времени — форм существования материи. Ее соотношения носят кинематический характер, и объектом ее законов является пространство — время. Так как пространство и время не существуют сами по себе, в отрыве от материальных тел и процессов, то, по существу, открытие теории относительности означало, что при больших скоростях движения любая фундаментальная теория, описывающая определенную форму движения материи, должна быть релятивистской.

Сама по себе теория относительности не может ничего объяснить в ходе естественных процессов. Она только налагает определенные требования на теории процессов, и в том случае, когда нам известен характер явлений, описываемых какой-либо фундаментальной теорией в данной инерциальной системе отсчета, теория относительности позволяет предсказать, каким он будет представляться в другой системе, движущейся с постоянной скоростью относительно первой. Теория относительности определяет характер преобразований не только координат и времени, но и любой другой физической величины.

Сразу же после создания теории относительности были сделаны попытки записать существовавшие ранее фундаментальные физические законы в релятивистской форме. На основе классической механики Ньютона были сформулированы релятивистские уравнения движения

Минковского, пригодные для описания движения частиц со скоростями, близкими к скорости света. Сами уравнения движения изменились, но динамический характер уравнений остался неизменным. И в релятивистской механике начальные значения координат и скоростей частиц системы однозначно определяют ее дальнейшую эволюцию.

С течением времени была развита также релятивистская механика сплошных сред.

Формулы преобразования различных термодинамических величин при переходе от одной инерциальной системы к другой были найдены Планком. Энтропия оказалась инвариантом, а температура и количество переданного тепла преобразуются при движении точно так же, как и обыкновенная длина.

Впрочем, как справедливо отметил Андерсон [11], такие термодинамические величины, как температура, имеют смысл только тогда, когда их рассматривают относительно системы отсчета, в которой данная физическая система покоится. С физической точки зрения говорить о трансформационных свойствах температуры не имеет особого смысла, так как подобные преобразования нельзя проверить на опыте даже в принципе. Результат измерения температуры движущимся относительно среды термометром будет зависеть от его конструкции, ориентации относительно направления движения и т. д.

В 60-е годы законы преобразования термодинамических величин были пересмотрены [12]. Если исходить из определения температуры с помощью уравнения состояния идеального газа, то получится результат Планка. Однако при определении температуры как меры средней кинетической энергии хаотического движения молекул получится другой результат: температура преобразуется как временной интервал.

Если же определить температуру как параметр, характеризующий тепловое равновесие, и принять, что тепловое равновесие устанавливается при взаимодействии систем, движущихся друг относительно друга, то температуру следует рассматривать как инвариант. Количество переданного тепла будет при этом преобразовываться таким же образом, как временной интервал. Данная точка зрения рассматривается сейчас как предпочтительная.

§ 7. Общая теория относительности. Теория гравитации

Краткий обзор фундаментальных физических теорий динамического характера близится к концу. Осталось сказать несколько слов только об одной теории, о великом творении Эйнштейна — общей теории относительности.

Основываясь на равенстве инертной и гравитационной масс, Эйнштейн сформулировал принцип эквивалентности — локальной неразличимости поля тяготения и поля сил инерции. Это означало возможность рассматривать все системы отсчета как равноправные.

В специальной теории относительности была выявлена зависимость пространственно-временных свойств от состояния движения. Но пространственно-временной континуум оставался абсолютным, не зависящим от материи вместилищем материи. Общая теория относительности вскрыла глубокую связь между геометрией пространства — времени и распределением в нем масс. Именно массы тел определяют геометрию пространства — времени. Компоненты метрического тензора, характеризующие метрику пространства — времени, одновременно являются потенциалами гравитационного поля.

Построенная Эйнштейном новая теория гравитации носит динамический характер. Компоненты тензора гравитационного поля и компоненты тензора материи, характеризующие ее распределение в пространстве, можно определить однозначным образом. Связи между всеми величинами, весьма сложные из-за нелинейности уравнений поля, также носят однозначный характер.

Теория гравитации Эйнштейна — это последний триумф динамических закономерностей. Прошло уже около 50 лет с момента создания общей теории относительности (срок очень большой для стремительного развития современной физики), но новые фундаментальные теории динамического типа не появились. Невольно возникает вопрос: не сталкиваемся ли мы здесь вообще с концом победного шествия динамических законов?

Физические теории динамического характера охватывают почти всю науку: движение тел, тепловые процессы, а также электромагнитные и гравитационные взаимодействия, т. е. те типы сил, которые были открыты к первой четверти XX века. Но уже далее, при открытии

новых типов сил — ядерных и слабых взаимодействий — первые попытки построения их теории носили статистический характер. Это произошло в то время, когда статистические закономерности в науке стали обычными, и поэтому данное обстоятельство не привлекло внимания. Однако следует особо подчеркнуть, что здесь впервые в истории науки при создании новых фундаментальных теорий, трактующих определенную форму движения материи, пришлось сразу же обратиться к статистическим законам. Во второй четверти XX века динамические законы явно утратили свою авангардную роль в попытках все более глубокого проникновения в тайны природы.

§ 8. Статистическая механика

Новая, статистическая, форма закономерности, пронизывающая ныне всю физику, зародилась во времена безраздельного господства динамических закономерностей.

Начало было положено попытками Бойля, Ломоносова и других рассматривать тепло как форму движения молекул. Количественная теория возникла не сразу. Сначала, взяв за основу атомистическую гипотезу строения вещества, ученые пытались с помощью наглядных представлений о беспорядочно движущихся молекулах качественно понять, что происходит в веществе при тепловых процессах. Затем начались попытки количественного анализа процессов. Трудности были очень велики и, вероятно, многим казались непреодолимыми. Ведь заведомо нужно было считать, что число частиц, составляющих макроскопические тела, огромно. Не оставлял сомнения тот факт, что движение их подчинено механике Ньютона; но как приступить к решению задачи о движении тел, если их число невообразимо велико? Ведь даже задача трех тел, связанных друг с другом очень просто выражаемыми количественно гравитационными силами, точно не решается.

Однако для наиболее простой системы (газа) Бернулли еще в начале XVIII века вычислил среднее давление газа на стенки сосуда, считая, что оно обусловлено многочисленными ударами молекул. Это удалось сделать, введя представление о средней скорости молекул. На первом этапе развития кинетической теории газов (он выполнен,

главным образом, Клаузиусом) ничего, кроме средних значений различных физических величин: скорости, числа столкновений, длины свободного пробега молекул и т. д., — не пытались искать.

Решительный шаг вперед был сделан в 1859 г. Максвеллом, который впервые ввел в физику понятие вероятности, выработанное ранее математиками при анализе азартных игр. В дальнейшем это понятие стало основным для любого статистического закона.

Что можно сказать о скоростях газовых молекул, кроме того, что их средняя скорость пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры?

Очевидно, мы не можем сейчас и никогда не сможем в дальнейшем точно определить скорости всех молекул газа в данный момент или проследить за изменением скорости одной молекулы в течение большого промежутка времени, как это требуется при механическом описании движения. Из макроскопических условий, в которых находится газ (определенные объем, температура и давление), не вытекают с необходимостью определенные значения скоростей молекул. Скорость молекулы следует рассматривать как случайную величину, которая может в данных макроскопических условиях принимать различные значения.

А нельзя ли получить определенный ответ относительно скоростей молекул при совершенно иной постановке вопроса? Пусть через некоторые промежутки времени было проведено n измерений скорости данной молекулы. В каком-то числе случаев (будем обозначать его через m) оказалось, что найденные скорости лежат внутри интервала от v до $v + dv$. Чему равно отношение m/n для данного интервала скоростей, если число измерений n неограниченно возрастает? Иными словами, чему равна вероятность того, что скорость газовой молекулы лежит в определенном интервале значений, ибо $\lim_{n \rightarrow \infty} (m/n)$

и называют вероятностью?

Максвеллу удалось решить эту задачу! Главная трудность, собственно, состояла не в решении, а в самой постановке новой проблемы. Максвелл впервые ввел в физическую теорию представление о закономерностях особого типа, в которых связи между величинами, входящими в теорию, носят вероятностный, неоднозначный характер. Он ясно осознал, что случайное движение

отдельных молекул подчинено определенному статистическому закону.

Возможности молекулярно-кинетической теории сразу же необычайно расширились. Знание вероятности того, что скорость молекулы вещества (газа, жидкости или твердого тела) лежит внутри определенного интервала, знание функции распределения молекул по скоростям, найденной Максвеллом, позволяет не только находить средние значения скоростей, но и определять вероятность отклонения от средних, рассчитывать флуктуации.

Трудно переоценить важность этих работ Максвелла. Без преувеличения можно сказать, что творец теории электромагнитного поля проявил не меньшую гениальность и в работах по молекулярно-кинетической теории. Если при создании теории электромагнетизма он нашел динамические законы новой, немеханической, формы движения материи, то здесь он открыл новый тип закономерности в физике, пригодной, как оказалось впоследствии, для описания любых форм движения,— статистическую закономерность. Правда, теория электромагнитного поля была создана им в законченном виде, а в кинетической теории был сделан лишь первый шаг. Но этот шаг был принципиально новым, что отчетливо понимал сам Максвелл. В докладе Кембриджскому философскому обществу он сказал: «Я считаю, что наиболее важное значение для развития наших методов мышления молекулярные теории имеют потому, что они заставляют делать различие между двумя видами познания, которые мы можем назвать динамическим и статистическим».

Работы Максвелла были выполнены в то время, когда существование атомов и молекул было лишь гипотезой, причем далеко не общепризнанной. Поэтому не удивительно, что значение работ Максвелла не было полностью оценено современниками. В наше время, когда статистическая механика уже давно приняла законченную форму, в первую очередь вспоминаются те огромные трудности, которые пришлось преодолеть при завершении теории, та напряженная борьба, которая разгорелась вокруг нее, и невольно забываются первые шаги этой теории. Но именно после данного Максвеллом толчка молекулярно-кинетическая теория (или статистическая механика, как ее стали называть в дальнейшем) начала стремительно развиваться.

Больцман построил кинетическую теорию газов. От решения хотя и важного, но частного вопроса распределения молекул по скоростям ему удалось перейти к созданию логически стройной теории, способной объяснить самые разнообразные процессы в веществе, исходя из предположения о том, что оно состоит из атомов и молекул, движение которых подчинено классической механике. Записанное Больцманом знаменитое кинетическое уравнение для функции распределения не утратило своего значения и в наше время. На основе его, в частности, ведутся расчеты таких ультрасовременных устройств, как ядерные реакторы. С помощью своего кинетического уравнения Больцман впервые совершенно строго доказал необходимость установления распределения Максвелла при термодинамическом равновесии.

Основная проблема, которую в значительной степени удалось решить Больцману, заключалась в согласовании обратимого по времени характера движения отдельных молекул с очевидной необратимостью всех макроскопических процессов. Введенная им в статистическую теорию H -функция возрастает в замкнутых системах подобно энтропии. Термодинамическому равновесию системы по Больцману соответствует максимум вероятности данного состояния, а необратимость процессов связана со стремлением систем к наиболее вероятному состоянию.

Поведение систем, состоящих из большого числа частиц, носит статистический, вероятностный характер. Лишь благодаря тому, что в таких системах отклонения различных физических величин от средних значений (флуктуации) невелики и вероятности больших флуктуаций ничтожны, динамические законы термодинамики выполняются с большой точностью, не обнаруживая заметных отклонений от действительности в явлениях, преимущественно изучавшихся физиками в конце XIX века.

В трудах Больцмана законы термодинамики впервые предстали перед учеными как следствие более глубоких статистических законов поведения большой совокупности частиц, подчиненных в своем индивидуальном движении динамическим законам механики.

Больцман совершенно четко поставил и во многих отношениях решил проблему соотношения между законами, управляющими поведением отдельных частиц (механика), и вероятностными законами поведения

совокупности этих частиц (статистическая механика). Одновременно с появлением теории Больцмана — первой последовательной статистической теории — обнаружилось, что статистическая теория тепловых процессов глубже феноменологической термодинамики и ни в каких отношениях не уступает ей.

Так одновременно возникли два аспекта проблемы соотношения динамических и статистических законов: соотношение между механикой Ньютона и статистической механикой и между статистической механикой и термодинамикой. Но центр тяжести вначале приходился почти исключительно на первый аспект. Нужно было осмыслить самое сложное: каким образом на основе физических законов движения отдельных частиц можно построить теорию макроскопических процессов? Совершенно очевидно, что проследить за движением всех частиц системы невозможно. Но надо было понять, что для объяснения свойств макроскопических тел это и не требуется, а нужно рассматривать вероятности поведения всей совокупности частиц в целом. В то время, до создания квантовой механики, никому не могло прийти в голову, что проблема, над решением которой начал работать Больцман, вовсе не составляет существа вопроса о соотношении динамических и статистических законов, а является проблемой связи между поведением отдельных объектов и поведением большой их совокупности.

Свое завершение статистическая механика получила в работах Гиббса, создавшего мощный и изящный метод расчета для любых систем (а не только газов), находящихся в состоянии термодинамического равновесия. Теория неравновесных процессов — физическая кинетика — полностью еще не построена и по сей день.

Именно Гиббс предложил наиболее эффективный метод вычисления средних значений физических величин для любых систем. Вместо непосредственного вычисления средних по времени для различных величин, которые характеризуют свойства системы из большого числа частиц, средних, непосредственно регистрируемых приборами или нашими органами чувств, следует искать статистические средние.

Одна реальная система в теории Гиббса представляется большим числом ее мысленных копий — ансамблем. Все системы ансамбля тождественны друг другу и являются точной копией реальной. Это означа-

ет, что все они имеют одинаковое строение и находятся в одинаковых макроскопических условиях, т. е. внешние параметры, определяющие макроскопическое состояние системы (объем, напряженность внешних полей и т. д.), и температура имеют одинаковые значения. Но микроскопические состояния систем, определяемые импульсами и координатами всех молекул, различны, причем каждое микросостояние, в котором может находиться реальная система, представлено в ансамбле некоторым количеством систем. Системы в ансамбле распределены по микросостояниям хаотически.

Статистическое среднее по ансамблю (математическое ожидание, вычисляемое с помощью функции распределения) заменяет, по Гиббсу, среднее по времени. Для теоретического вычисления средних по времени нужно было бы решить систему громадного числа микроскопических уравнений движения с определенными начальными условиями. Эту задачу невозможно не только решить, но даже поставить. Доказательство совпадения средних по ансамблю и средних по времени составляет содержание так называемой эргодической проблемы, не решенной полностью в общем случае и до настоящего времени.

Зная функцию Гамильтона системы, определяемую характером взаимодействия слагающих ее частиц друг с другом и с внешними телами, а также условия, в которых находится система (например, адиабатическая изоляция или идеальный тепловой контакт с большим резервуаром постоянной температуры — термостатом), можно найти функцию распределения. Она определяет вероятность того, что координаты и импульсы всех частиц системы при термодинамическом равновесии лежат внутри определенных интервалов. Функция распределения задает ансамбль.

Для системы, состоящей из N частиц, вероятность найти систему в определенном состоянии равна

$$dW = f(x_1, y_1, z_1, \dots, x_N, y_N, z_N; p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}, \dots, p_{Nx}, p_{Ny}, p_{Nz}) dx_1 dy_1 dz_1 \dots dx_N dy_N dz_N dp_{1x} dp_{1y} dp_{1z} \dots dp_{Nx} dp_{Ny} dp_{Nz},$$

где x_i, y_i, z_i — координаты i -й частицы, p_{1x}, p_{1y}, p_{1z} — ее импульсы, f — функция распределения.

Вероятность dW можно рассматривать как отношение числа систем ансамбля Гиббса dN , находящихся в определенных микросостояниях, к полному числу систем

ансамбля, когда это число стремится к бесконечности, т. е.

$$dW = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{dN}{N}.$$

Знание функции распределения позволяет вычислить любые термодинамические функции (ибо они являются не чем иным, как статистическими средними различных физических величин), а также вероятность отклонения от этих средних.

Несмотря на большие успехи, статистическая механика не сразу получила общее признание. Лишь в 1905 г., после того, как Эйнштейном и Смолуховским была дана количественная теория броуновского движения, последние сомнения в реальности молекул и, соответственно, справедливости статистической механики отпали. Дело в том, что случайные блуждания мельчайших твердых частиц, взвешенных в жидкости или газе, которые были открыты ботаником Броуном еще в 1826 г., всецело обусловлены случайными отклонениями давления в малых объемах от его среднего значения — флуктуациями давления. Броуновская частица принимает участие в тепловом движении молекул и, поскольку она видна в микроскоп, с несомненностью демонстрирует наличие этого движения. Движение броуновских частиц нельзя объяснить чисто термодинамически, так как рассмотрение флуктуаций выходит за рамки термодинамики. Броуновское движение — это первое детально исследованное явление, вызванное флуктуациями. Впоследствии было обнаружено очень большое число подобных явлений, причем многие из них имеют практическое значение. При рассмотрении броуновского движения выявляется одна важная особенность, очень существенная для нашего исследования. Здесь статистический закон в определенном смысле явно присущ движению одной частицы. Именно, ансамбль Гиббса в данном случае состоит из тождественных систем, каждая из которых представляет собой броуновскую частицу в сосуде. Это объясняется просто тем, что взаимодействие друг с другом броуновских частиц, взвешенных в жидкости или газе, не влияет сколько-нибудь существенным образом на их поведение.

Итак, совершенно очевидно, что статистическая теория тепловых процессов, которую часто называют статистической термодинамикой, оказалась несравненно глубже обычной термодинамики.

§ 9. Физическая кинетика

В классической термодинамике и статистической механике рассматриваются равновесные состояния макроскопических систем. Большой интерес для современной физики представляет изучение процессов, возникающих в системах, выведенных из состояния теплового (термодинамического) равновесия. Эти процессы необратимы, и их исследование составляет предмет физической кинетики.

Как и в случае равновесных состояний, в физической кинетике возможны два способа описания: феноменологический, или термодинамический (термодинамика необратимых процессов), и статистический (статистическая теория необратимых процессов).

При термодинамическом описании неравновесных процессов рассматривается изменение с координатами r и временем t таких макроскопических функций состояния, как плотность массы $\rho(r, t)$, плотность импульса $\rho u(r, t)$ (u — средняя локальная скорость), температура $T(r, t)$, давление $p(r, t)$, плотность потока внутренней энергии или энтропии $S(r, t)$. Эти функции часто называются локальными термодинамическими функциями. В равновесном состоянии ρ , T и т. д. постоянны.

Важнейшей характеристикой неравновесных процессов является время, в течение которого система из неравновесного состояния переходит в состояние теплового равновесия. Это время называется временем релаксации; оно не зависит в первом приближении от характера отклонения системы от состояния равновесия.

Термодинамическое описание неравновесных процессов возможно лишь при достаточно медленном изменении функций состояния, когда время релаксации велико по сравнению с временем взаимодействия частиц, характерным для исследуемой системы. Так, например, для газов время релаксации велико по сравнению со средним временем свободного пробега молекул, т. е. со средним временем между двумя последовательными столкновениями.

У многих систем в малых объемах достаточно быстро устанавливается состояние неполного равновесия за счет быстрых процессов. Поэтому для малых частей системы применимы термодинамические понятия

температуры, энтропии и т. д., но эти величины меняются от точки к точке или изменяются во времени.

Для основных характеристик среды записываются так называемые уравнения переноса, выражающие собой законы сохранения массы, импульса и энергии в движущейся среде. Закон сохранения массы описывается уравнением непрерывности. Уравнение движения, выражающее перенос импульса, представляет собой обобщение уравнения Эйлера в механике сплошных сред на случай учета вязкости среды. В случае пренебрежения сжатием жидкости получается так называемое уравнение Навье — Стокса. К механическим уравнениям добавляется уравнение баланса энергии (или уравнение переноса энтропии). Все эти уравнения являются полуэмпирическими и содержат так называемые кинетические коэффициенты, зависящие от свойств среды. Важнейшие из них — первый и второй коэффициенты вязкости и коэффициент теплопроводности. Последние должны быть определены экспериментально. Для того чтобы система уравнений для однокомпонентной среды была замкнутой, необходимо добавить два эмпирических уравнения: уравнение состояния, связывающее давление p , плотность ρ и температуру T , и калорическое уравнение, дающее зависимость энергии или энтропии от p и T .

Таким образом, лишь после построения термодинамики необратимых процессов появилась возможность записать полную систему уравнений механики сплошных сред в общем случае. Именно в механике сплошных сред исследуются решения системы уравнений для локальных термодинамических величин, о которых шла речь.

Статистическая теория неравновесных процессов более детальна и глубока, чем термодинамическая. Она в принципе позволяет рассчитывать как быстрые процессы, так и медленные. Если с помощью термодинамического метода невозможно найти кинетические коэффициенты, определяющие интенсивность таких процессов, как диффузия, теплопроводность, внутреннее трение, электропроводность и т. д., то статистическая теория позволяет их вычислить на основе определенных представлений о строении вещества и действующих между молекулами силах.

Однако статистическая теория неравновесных процессов весьма сложна. Для равновесных состояний

имеются универсальные функции распределения для координат и импульсов (или скоростей) всех частиц, определяющие вероятность того, что данные величины принимают фиксированные значения. Для систем в термостате — это каноническое распределение Гиббса, для изолированных систем — микроканоническое распределение. Последнее распределение полностью определяется энергией системы.

Изменения неравновесных состояний в гораздо большей степени зависят от микроскопических свойств систем: свойств атомов и молекул и сил взаимодействия между ними. Соответственно не существует универсальной функции распределения, описывающей поведение всех тел или все процессы, протекающие в одном теле. Поэтому удастся установить лишь небольшое число соотношений, имеющих общий характер для всех систем.

Кинетическое описание медленных процессов дается уравнением Эйнштейна — Фоккера — Планка для плотности вероятности состояния системы в зависимости от времени и совокупности параметров, характеризующих данное состояние. Это уравнение обладает большой общностью (справедливо для всех медленных процессов), но не дает детальных сведений о поведении систем частиц и содержит коэффициенты, которые либо нужно определять эмпирически, либо получать с помощью более детальной статистической теории.

Наиболее полный метод описания неравновесных процессов основан на нахождении функций распределения. Пользуясь ими, можно определить любые макроскопические величины, характеризующие состояние системы, и проследить за их изменением в пространстве с течением времени. Это достигается посредством вычисления статистических средних.

Нахождение функции распределения, зависящей от координат и импульсов всех частиц, является неразрешимой задачей, так как оно эквивалентно решению уравнений движения для всех частиц системы. Оказывается, однако, что для практических целей нет необходимости в знании точного вида этой функции распределения. Она содержит слишком подробную информацию о движении отдельных частиц, которая несущественна для определения поведения системы в целом. Поэтому используется приближенное статистическое описание с помощью более простых функций распределения

$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$, дающих среднее число частиц с определенными значениями импульсов \mathbf{p} (или скоростей \mathbf{v}) и координат \mathbf{r} (одночастичные функции распределения). Общий метод получения уравнений для таких функций был разработан Н. Н. Боголюбовым, Борном и Грином и др. Эти уравнения называются кинетическими. К их числу относится кинетическое уравнение Больцмана для разреженных газов, о котором упоминалось выше. Разновидностями уравнения Больцмана для ионизированного газа (плазмы) являются кинетические уравнения Л. Д. Ландау и А. А. Власова.

В кинетических уравнениях наряду с внешними воздействиями учитывается взаимодействие частиц. Именно оно приводит к установлению равновесных состояний, причем взаимодействия частиц рассматриваются обычно как столкновения. В стационарном состоянии изменение функции распределения вследствие внешних воздействий компенсируется ее изменением в результате столкновений. В простых случаях последнее пропорционально отклонению функции распределения системы от равновесной, так как только при нарушении равновесия столкновения меняют функцию распределения. Коэффициентом пропорциональности служит величина, обратная времени релаксации, т. е. времени перехода системы в равновесное состояние. В общем случае учесть взаимодействие частиц таким простым образом невозможно, и в кинетическое уравнение входит так называемый интеграл столкновений, который более точно учитывает результат изменения функции распределения вследствие взаимодействия частиц.

Основные принципы теории неравновесных процессов в настоящее время надежно установлены. Однако создание достаточно эффективных методов приближенного решения сложных задач требует дальнейших усилий.

Для нашего исследования наиболее существенно то, что статистическая теория неравновесных процессов позволяет получить основные динамические уравнения термодинамики неравновесных процессов (в частности, уравнения механики сплошных сред) и позволяет, по крайней мере в принципе, теоретически рассчитать различные кинетические коэффициенты, которые в феноменологической теории должны определяться экспериментально.

§ 10. Микроскопическая электродинамика

В конце XIX — начале XX века статистические методы были распространены на электромагнитные процессы. Лоренцем были заложены основы электронной теории, называемой сейчас чаще микроскопической электродинамикой. Она относится к макроскопической электродинамике Максвелла точно так же, как статистическая термодинамика к феноменологической.

Необходимость построения этой теории вытекала из тех недостатков, которые были свойственны теории Максвелла вследствие ее феноменологического характера. Электромагнитные свойства вещества в микроскопической электродинамике задаются тремя величинами: диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостями и удельной проводимостью σ . Эти величины нельзя найти в рамках теории Максвелла.

Уже сам факт введения в теорию эмпирически определяемых величин, не мировых констант, а функций координат и времени, снижает ее ценность. Однако дело обстоит еще сложнее. Эти величины далеко не всегда остаются постоянными, не зависящими от электромагнитного поля характеристиками вещества. Для многих веществ они являются функциями напряженности полей. В переменных полях обнаруживается их зависимость от частоты (временная дисперсия), а для таких сред, как плазма, — и от длины волны (пространственная дисперсия). В теории Максвелла эти зависимости не имеют объяснения. Наконец, в феноменологической теории нельзя найти зависимости электромагнитных свойств вещества от температуры, а такая зависимость в ряде случаев очень существенна. Ферромагнитные тела, например, при нагревании теряют свои ярко выраженные магнитные свойства и превращаются в парамагнетики.

Подобно тому, как при построении статистической механики делается предположение об атомно-молекулярном строении вещества, при построении микроскопической электродинамики делается предположение о дискретном строении электрических зарядов, т. е. о том, что вещества построены из электрически заряженных частиц, наделенных массой. Их движение в классической электродинамике описывается теми же уравнениями Ньютона.

Заряженные частицы взаимодействуют друг с другом не непосредственно, а через электромагнитное поле. Соответственно в теории появляется новый (по сравнению с обычной статистической механикой) класс микроскопических уравнений — уравнения Максвелла — Лоренца для элементарных электромагнитных процессов. После той борьбы, которую пришлось выдержать основателям статистической механики, идеи Лоренца были встречены в основном сочувственно и не вызвали особых дискуссий. Статистические методы были уже разработаны, и речь шла лишь о распространении их на новую область. Рамки статистической теории были настолько широкими, что оказалось возможным рассматривать в ней и электромагнитные процессы.

Впрочем, вначале, как и в первых работах по молекулярно-кинетической теории, ограничивались вычислением средних значений токов, полей и т. д. и не исследовали их случайного разброса, который обусловлен тепловым движением. Уже на этом простом пути были получены замечательные результаты. Усреднением своей системы уравнений Лоренц получил макроскопические уравнения Максвелла. При этом был выяснен физический смысл электромагнитных характеристик вещества ϵ , μ , σ и стала понятной физическая природа векторов E, D, H, B . Неожиданным образом выяснилось, что основным вектором, определяющим воздействие магнитного поля на движущиеся заряды, является магнитная индукция B , а не напряженность поля H ; напряженность магнитного поля — это вспомогательный вектор, введение которого позволяет не рассматривать в явной форме токи, вызванные перемещением связанных зарядов, подобно тому как введение вектора D позволяет исключить из системы уравнений Максвелла связанные заряды. Далее Лоренц построил теорию нормального эффекта Зеемана (расщепление спектральных линий в сильном магнитном поле), исходя из предположения, что излучение света атомами обусловлено движением в них электронов. Он же построил теорию дисперсии света в разреженных газах.

Эти теории, по существу, нельзя назвать статистическими. Соотношения между усредненными характеристиками, которые рассчитывались в теории без учета теплового движения, носили однозначный характер, обычный для электродинамики Максвелла, а ничего,

кроме них, не вычислялось. Лишь потому, что тепловое движение не влияет существенно на такие явления, как дисперсия света или эффект Зеемана, подобное рассмотрение приводило к неплохим результатам.

Довольно парадоксальным образом методы классической статистической механики в теории электромагнитных процессов применили прежде всего к проблеме, которая вообще не имеет решения в классической физике. И это в то время, когда имелся целый ряд проблем электродинамики, лежащих в сфере компетенции классической статистической теории и ожидавших своего решения.

Статистическую механику применили к проблеме теплового равновесия между веществом и электромагнитным излучением, что в конечном счете привело к величайшей революции в области физики — появлению теории квантов.

В том, что именно данная проблема начала изучаться в первую очередь, была своя логика. Состояние теплового равновесия подчинено общим законам термодинамики, справедливым для любой формы движения материи. Их пригодность ведь никак не связана со спецификой свойств материи. Поэтому после открытия Максвеллом закономерностей электромагнитных процессов стали применять законы термодинамики к электромагнитному полю в чистом виде, к излучению. Факт существования термодинамического равновесия между любым веществом и излучением привел к следующему выводу: плотность энергии излучения $u(\nu, T)$, находящегося в тепловом равновесии с веществом, в узком интервале частот определяется только температурой излучения, равной температуре вещества, и совершенно не зависит от свойств вещества. Чисто термодинамическим путем Больцман нашел, что плотность энергии $u(T)$, приходящаяся на все частоты, пропорциональна четвертой степени температуры. Однако феноменологический характер термодинамики не позволял рассчитать распределение энергии по частотам. Эта задача совершенно отчетливо встала перед физиками к самому концу XIX века.

Преимущество ее перед другими проблемами состояло в том, что для статистического рассмотрения задачи не нужно было знать детали строения атомов, излучающих и поглощающих электромагнитные волны. Ведь при любом строении вещества, способного излучать и

поглощать волны любой длины, должно существовать равновесие между веществом и излучением. Если строение атома неизвестно, то такая задача всего более подходит для решения в рамках статистической механики. Можно воспользоваться простейшей моделью атома, обеспечивающей излучение и поглощение волн любой длины, например рассматривать вещество как совокупность линейных гармонических осцилляторов.

Законы статистической механики были применены к тепловому излучению и привели к невероятному результату. Равновесие между веществом и излучением вообще невозможно: $u(\nu, T) \rightarrow \infty$ при $\nu \rightarrow \infty$. Было от чего прийти в растерянность: на больших частотах вещество должно катастрофически терять энергию, отдавая ее полю и охлаждаясь до абсолютного нуля. Причина этого состоит в конечном счете в том, что на одну степень свободы, согласно классической статистической теории, приходится при тепловом равновесии энергия порядка kT , где k — постоянная Больцмана, а поле представляет собой систему с бесконечным числом степеней свободы.

К счастью, подобный вывод не подорвал доверия к статистическому методу. Вскоре Планк показал, причем показал, основываясь на статистическом выражении для энтропии, полученном Больцманом, что дело здесь не в ложности статистической теории, а в неприменимости к отдельным осцилляторам законов классической механики и классической электродинамики*). Постулировав дискретность значений энергии осциллятора и, соответственно, прерывность излучения электромагнитной энергии, Планк, используя статистический метод, нашел распределение энергии излучения по частотам, превосходно совпадающее с экспериментальным.

Открытие неприменимости законов классической физики для исследования индивидуальных микроскопических процессов — величайший триумф статистических теорий, находившихся в то время еще в стадии становления. Если бы статистические законы не были открыты, то возникновение квантовой теории задержалось бы на неопределенное время и вряд ли произошло бы раньше, чем было бы в деталях изучено строение атомов.

*) Все это было понято не сразу в отчетливой форме, что, однако, для нашего рассмотрения несущественно.

Для объяснения электромагнитных свойств вещества статистические методы во всей своей полноте, с учетом теплового движения, были применены впервые в 1905 г. Ланжевром при построении теории парамагнетизма. Парамагнетизм, в отличие от диамагнетизма, существенным образом зависит от температуры, и пренебречь здесь эффектами, вызванными тепловым движением молекул, просто нельзя.

Ланжевэн использовал распределение Больцмана, являющееся частным случаем распределения Гиббса, когда взаимодействием частиц друг с другом можно пренебречь по сравнению с взаимодействием их с внешними полями (в данном случае с внешним магнитным полем). Блестящий успех сопутствовал решению этой первой статистической задачи микроскопической электродинамики вещества. Была найдена магнитная проницаемость μ как функция температуры.

В теории Ланжевэна только ориентация молекул рассматривалась как случайная величина. Само магнитное поле выступало в форме определенного среднего. В дальнейшем электромагнитные процессы целиком были включены в рамки статистической теории. Мгновенные значения микроскопических напряженностей электрических и магнитных полей стали рассматриваться как случайные функции.

В микроскопической электродинамике можно вычислить не только средние значения любых электродинамических величин, но и вероятности отклонения их от средних значений. Была создана теория флуктуаций электромагнитных величин. В феноменологической электродинамике Максвелла этот вопрос фактически нельзя было даже поставить.

В частности, была создана теория рассеяния света на микроскопических неоднородностях среды, вызванных флуктуациями плотности среды в малых объемах (порядка длины световой волны). Именно таким образом был объяснен голубой цвет неба и ряд других явлений.

Сейчас особое значение приобрело исследование флуктуаций тока и напряжения в различных радиотехнических устройствах. Чувствительность аппаратуры возросла настолько, что она способна регистрировать сигналы ничтожной мощности. При этом тепловые флуктуации, или шумы, как их обычно называют, могут превосходить по мощности принимаемый сигнал. Развилась

целая отрасль знания — статистическая радиотехника, одной из основных задач которой является выделение слабых сигналов из шума.

Все большее значение приобретает исследование четвертого состояния вещества — плазмы, представляющей собой совокупность электронов, ионов и нейтральных молекул. В этой среде основную роль играют электромагнитные взаимодействия заряженных частиц, и лишь статистическая теория, как правило, способна дать ответ на различные проблемы, связанные с поведением плазмы, — от вопроса о специфических плазменных колебаниях и до вопросов устойчивости высокотемпературной плазмы во внешнем поле, столь актуальных при исследовании возможности осуществления управляемых термоядерных реакций.

При решении ряда проблем классическая микроскопическая электродинамика столкнулась с непреодолимыми трудностями. Теория электропроводности и теплоемкости металлов приводила к выводам, находящимся в резком противоречии с опытом. Необъяснимой оставалась природа ферромагнетизма и т. д. Лишь после создания квантовой механики стало ясно, что дело здесь в неприменимости динамических законов классической механики, используемых при построении статистических теорий соответствующих макропроцессов. Эти процессы, равно как и равновесное тепловое излучение, можно было объяснить лишь после построения квантовой статистики.

Краткий обзор развития микроскопической электродинамики не оставляет сомнения в том, что эта статистическая теория является дальнейшим шагом вперед по сравнению с электродинамикой Максвелла. Она глубже проникает в сущность явлений и охватывает больший круг проблем. Как и в теории тепла, здесь соотношение между динамическими и статистическими закономерностями выступает в двух планах. Первый — соотношение динамической теории Максвелла и микроскопической теории электромагнитных явлений с участием большого числа заряженных частиц, и второй — соотношение динамических законов элементарных электромагнитных процессов и статистических законов поведения систем, включающих громадное количество таких процессов.

Как при зарождении теории, так и сейчас основные трудности состоят в отыскании статистических законо-

мерностей электромагнитных процессов в макроскопических телах на основе хорошо известных микроскопических уравнений и определенных представлений о строении вещества. Здесь непрерывно возникают новые задачи (например, в теории плазмы) и ждет более строгого решения ряд старых. Внимание приковано именно к данному кругу вопросов. Выяснение же соотношения статистической теории электромагнитных макроскопических процессов и феноменологической теории Максвелла не составляет сложной проблемы, и связь между ними давно уже вскрыта Лоренцем.

Средние статистической теории — это как раз те величины, с какими имеет дело теория Максвелла.

Надо сказать, что, несмотря на бесспорное с современной точки зрения основополагающее значение микроскопических уравнений Максвелла — Лоренца, до сих пор вследствие некоторой исторической aberrации основу всей электродинамики часто видят в феноменологической теории Максвелла. Это находит свое отражение уже в том, что преподавание электродинамики обычно начинается с теории Максвелла. Соответствующим образом построено большинство учебников. Лишь в последние годы в изложении теории электромагнитных явлений упор с самого начала делается на микроскопические уравнения. Именно так, например, построен курс теоретической физики Ландау и Лифшица *).

Причины, по которым не всегда вполне ясно представляют себе соотношение микро- и макротеорий электромагнитного поля, очевидны. Исторически первыми были открыты макроскопические уравнения поля. Микроскопические уравнения были постулированы с таким расчетом, чтобы усреднение их приводило к теории Максвелла. Однако это ни в коей мере не должно заслонять того факта, что в действительности первичными являются микроскопические уравнения Максвелла — Лоренца, а уравнения Максвелла — производными от них. Так, в частности, закон Кулона для взаимодействия макроскопических зарядов выполняется только потому, что он справедлив для электронов и других заряженных

*) В этом курсе ни термодинамика, ни феноменологическая теория Максвелла не выделяются в особые разделы. Термодинамика включена в том «Статистическая физика», а макроскопическая электродинамика излагается на основе теории микроскопических полей в томе «Электродинамика сплошных сред».

частиц, хотя наши сведения о характере взаимодействия заряженных элементарных частиц мы первоначально получили, изучая силы между макрозарядами.

Микроскопические уравнения электромагнитного поля формулируются совершенно однозначно. Феноменологические же уравнения Максвелла не имеют однозначной формы. В зависимости от выбора формы материальных уравнений, связывающих различные характеристики полей друг с другом, уравнения поля принимают ту или иную форму. Эта форма диктуется соображениями удобства. Очень часто уравнения Максвелла записывают сейчас совсем не в том виде, какой им придал Герц и которым пользовались на протяжении нескольких десятилетий.

§ 11. Квантовая механика

Теперь перейдем к следующему, во многих отношениях самому важному этапу проникновения статистических теорий в физику — к квантовой теории.

Если проникновение статистических методов в электродинамику было совершенно естественным и не вызывало дискуссий, то обнаружение в 20-х годах нашего века статистического характера движения микрообъектов (в первую очередь элементарных частиц) вызвало настоящую сенсацию и породило дискуссии, не прекращающиеся до наших дней.

Представление о существовании минимального кванта действия $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек}$ зародилось в рамках статистической теории равновесного излучения. Но статистический характер этой теории не был непосредственно связан с квантом действия.

Первый намек на то, что положение здесь довольно сложно, содержался в развиваемых Эйнштейном представлениях о фотонах — квантах электромагнитного поля. Он показал, что тепловые флуктуации плотности энергии электромагнитного излучения обусловлены двумя причинами. Одно слагаемое в выражении для флуктуаций имеет чисто волновое происхождение, другое — корпускулярное. Ни чисто волновое, ни чисто корпускулярное представление о свете не соответствовало действительности. Начала проступать двойственность свойств света, но природа флуктуаций считалась по-прежнему классической, тепловой. Совершенно по-иному, вне ка-

кой-либо связи с тепловым движением, статистический характер излучения обнаружился при анализе взаимодействия света с веществом в процессах, при которых тепловое движение не играет роли. Дискретность светового излучения, проявляющуюся при фотоэффекте (вырывании светом электронов с поверхности вещества), можно было, как заметил Эйнштейн, согласовать с волновыми его свойствами, обнаруживающимися при интерференции и дифракции, лишь в том случае, если рассматривать уравнения электромагнитного поля как вероятностные законы, определяющие статистику поведения фотонов. Выводы Эйнштейна показались слишком необычными не только большей части ученых, но и самому автору. На протяжении многих лет они не получили существенного развития *).

На основе представлений Планка о дискретных значениях энергии осциллятора начала развиваться квантовая статистическая теория поведения большой совокупности частиц. Крупным успехом ее явилось объяснение зависимости теплоемкости твердых тел от температуры — факт, непонятный в рамках классической статистической механики, исходящей из допущения, что атомные системы подчиняются классической механике Ньютона.

В результате этих успехов становилось все более ясным, что движение электронов в атомных системах не подчиняется классической механике. После экспериментов Резерфорда, приведших к созданию планетарной модели атома, начали применять квантовые принципы к движению атомных электронов (до этого умели квантовать только энергию осциллятора), причем первые теории носили в основном динамический характер.

Бор построил квантовую модель атома динамического типа. Теория Бора, в которой удачно скомбинированы новые квантовые принципы с законами классической механики, унаследовала динамический характер последней. Бор нашел метод вычисления стационарных значений энергии в атоме водорода. Впоследствии Зоммерфельд и Вильсон получили правила квантования других периодических и квазипериодических систем.

*) Был установлен лишь один важный результат: Эйнштейн получил формулу Планка для равновесного излучения, исходя из представления о фотонах и введя явно понятия вероятности излучения и поглощения света атомами.

Надо заметить, что уже в теории Бора переходы систем из одного состояния в другое явно не подчинялись каким-либо динамическим законам. Вопрос о переходах систем вообще оставался в ней неясным; его можно было анализировать, только опираясь на принцип соответствия.

Проникновение статистических методов в механику микрообъектов произошло в значительной степени внезапно. Первые успехи, а затем непреодолимые трудности полуклассической теории Бора выдвинули в качестве главной задачи физики микромира построение последовательной квантовой теории движения микрочастиц. Такая теория — нерелятивистская квантовая механика — была создана одновременно в форме матричной механики Гейзенберга и волновой механики Шредингера, оказавшихся впоследствии различными представлениями одной теории.

Основным уравнением нерелятивистской квантовой механики является уравнение Шредингера для волновой функции $\Psi(x, y, z, t)$. С движением свободной частицы (электрона) волна была связана впервые в работах де Бройля. Шредингер обобщил результаты де Бройля на случай движения частиц в произвольных внешних полях.

Уравнение Шредингера позволяет однозначно определить Ψ в любой момент времени, если известно значение Ψ в начальный момент времени. В этом отношении оно носит динамический характер. Но какой физический смысл имеет волновая функция? Уравнение для нее было написано путем расширения оптико-механической аналогии Гамильтона до того, как стал ясен физический смысл Ψ .

Естественные предположения о связи волновой функции с непрерывно распределенной материей частицы в пространстве или с числом частиц в данной области пространства оказались несостоятельными. Пытаясь построить теорию движения элементарных частиц, которая относилась бы к классической механике Ньютона так же, как волновая оптика — к геометрической, Шредингер получил неожиданно *статистическую теорию*.

Ее статистический характер был установлен Борном, вспомнившим ранние работы Эйнштейна по теории фотонов и тщательно проанализировавшим квантовую задачу о рассеянии частиц. Оказалось, что $dW = \Psi\Psi^*dV$ име-

ет смысл вероятности обнаружения частицы в данном объеме пространства dV . Квантовая механика позволяет определять не сами координаты, а лишь *вероятность* того, что координаты частицы лежат внутри определенного интервала. Положение здесь в принципе оказывается таким же, как и в классической статистической теории, поскольку в обеих теориях однозначным образом определяются вероятности значений различных физических величин, а не сами величины. Таким образом, «динамические элементы» представлены в квантовой механике не в большей мере, чем в любой другой статистической теории.

После истолкования физического смысла волновой функции дальнейшее развитие интерпретации новой теории пошло быстро. Было доказано, что функция $\Psi(x, y, z, t)$ полностью характеризует состояние частицы в квантовой механике, так же, как импульсы и координаты целиком определяют состояние в классической механике. Прежде всего, она позволяет найти вероятность того, что не только координата, но и любая физическая величина (импульс, энергия, момент импульса и т. д.) имеет определенное значение. В отличие от ситуации в классической механике, некоторые величины (момент импульса, энергия при движении в ограниченной области пространства и т. д.) могут принимать лишь ряд дискретных значений. Возможные значения физических величин являются собственными значениями операторов, которые сопоставляются в квантовой механике каждой физической величине. Величина может принимать определенные значения с вероятностью, равной единице, лишь в том случае, если система находится в состоянии, изображаемом собственной функцией соответствующего оператора. Тогда вероятность превращается в достоверность.

Зная волновую функцию, можно также вычислить среднее значение любой физической величины и отклонение от среднего — дисперсию.

В микромире наиболее поразительным представляется то, что статистический характер имеет поведение отдельной частицы и появление вероятностных законов не связано с наличием большого числа частиц.

При формулировке квантовой механики для систем одинаковых, тождественных частиц необходимо ввести еще один новый фундаментальный принцип, который не

вытекает из рассмотрения движения одной частицы, а именно принцип тождественности, или неразличимости, частиц.

В классической механике одинаковые частицы всегда можно различить по их состояниям. Частицам присуща определенная индивидуальность. Их можно в принципе пронумеровать и следить за перемещением любой из них, так как они имеют строго определенные траектории. В квантовой механике даже в принципе проделать это невозможно, так как квантовая частица не имеет траектории. Если волновые функции двух частиц перекрываются, то в области перекрытия функций никакой физической метод не позволяет отличить одну частицу от другой, индивидуализировать частицы. Поэтому, хотя тождественность частиц не вытекает непосредственно из квантовой механики одной частицы, она целиком соответствует духу этой теории.

Тождественность микрочастиц состоит не только в тождественности свойств, но и в тождественности состояний. *В природе реализуются лишь те состояния совокупности одинаковых частиц, которые не изменяются при обмене одинаковых частиц местами.* Соответственно состояния системы описываются либо симметричными, либо антисимметричными волновыми функциями, причем характер симметрии волновой функции определяется собственным моментом импульса частицы, ее спином, служащим важнейшей характеристикой элементарной частицы. Частицы со спином, кратным \hbar , описываются симметричными волновыми функциями, частицы с полуцелым спином — антисимметричными функциями.

Для частиц со спином $\hbar/2$ в приближении невзаимодействующих частиц выполняется принцип Паули, согласно которому в системе одинаковых частиц две частицы или большее их число не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии.

О причине статистического характера квантовой механики (как одной частицы, так и их совокупности) можно сказать следующее. Если появление статистических законов в теории тепла связано с дискретностью в строении тел (наличием атомов и молекул), а появление статистических законов в классической электродинамике — с дискретностью электрических зарядов, то появление статистических законов движения отдельных элементарных частиц связано с дискретностью действия, с на-

личием в природе минимального, предельного значения действия — постоянной Планка \hbar .

В классической статистической механике и электродинамике относительные флуктуации, т. е. случайные отклонения от равновесных значений, отнесенные к самим равновесным значениям, пропорциональны $1/\sqrt{i}$, где i — число степеней свободы системы. Для непрерывных систем $i \rightarrow \infty$ в любом объеме и выводы статистических теорий приобретают вполне однозначный характер. Именно так обстояло бы дело при непрерывном строении материи, при ее бесконечной делимости.

Аналогично, при $\hbar \rightarrow 0$ мы получаем из квантовой механики классическую с ее однозначными связями. Дискретность действия обуславливает особые квантовые флуктуации нетепловой природы, которые не исчезают при стремлении абсолютной температуры к нулю. Это свидетельствует об особой специфике причин, определяющих статистический характер квантовой механики.

§ 12. Квантовая статистика

Подобно тому, как на основе классических законов движения отдельных частиц была построена теория поведения большой их совокупности — классическая статистика, на основе квантовых законов движения отдельных частиц была построена квантовая статистика. Последняя описывает поведение макроскопических объектов в том случае, когда классическая механика неприменима для описания движения слагающих их частиц.

Собственно говоря, развитие квантовой теории началось с построения статистической теории теплового излучения. Но это еще были первые попытки. Квантовая статистика как стройная, последовательная теория была создана после открытия квантовой механики.

Нельзя сказать, что при построении квантовой статистики возникли особые затруднения. Разработанные в классической статистике методы оказалось возможным применить почти во всем их объеме и при создании квантовой статистики.

Конечно, математический аппарат квантовой статистики существенно отличается от аппарата статистики классической. Но содержание самой статистической теории не претерпело глубоких изменений. Фактически был

выдвинут лишь один новый фундаментальный принцип — тождественность одинаковых частиц.

Прежде всего надо отметить, что ряд величин в квантовой механике (энергия, квадрат момента импульса и т. д.) принимает дискретные значения. Однако это приводит лишь к тому, что обычные для классической статистики интегралы, с помощью которых вычисляются статистические средние, заменяются в квантовой статистике суммами (см., например, [13]).

Более серьезное различие классической и квантовой статистик связано с тем, что квантовая механика, в отличие от классической, сама является статистической теорией. Состояние системы в квантовой механике определяет не сами механические величины, как в механике Ньютона, а *законы их распределения*. Эта принципиально статистическая природа квантовой механики совершенно не зависит от специальных методов физической статистики, в которых средними значениями всегда считают результаты усреднения *по различным состояниям системы*. В квантовой же механике идет речь только о *средних значениях в данном фиксированном состоянии системы*. Квантовая статистика оказывается, таким образом, статистической теорией в двояком значении этого слова.

Однако статистический характер квантовой механики не имеет ничего общего, кроме вероятностных способов описания, со статистическим методом трактовки совокупности большого числа частиц, и поэтому переход от квантовой механики к квантовой статистике осуществляется так же, как и переход от классической механики к классической статистике.

Самое существенное отличие квантовой статистики от классической связано с фундаментальным принципом тождественности частиц в квантовой механике. В классической статистике перестановка двух одинаковых частиц меняет микроскопическое состояние системы. Поэтому, если имеется совокупность N одинаковых частиц в различных состояниях, причем n_1, n_2, \dots, n_k — числа частиц в этих состояниях, то число возможных состояний системы, получающихся при перестановке одинаковых частиц (так называемая кратность состояния системы), равно

$$\Omega(n_1, n_2, \dots, n_k) = \frac{N!}{n_1! n_2! \dots n_k!}.$$

В квантовой статистике состояние системы не изменяется при перестановке одинаковых частиц, причем если частицы имеют целый спин, то в одном и том же состоянии может находиться любое их число; кратность состояния в данном случае равна

$$\Omega(n_1, n_2, \dots, n_k) = 1.$$

Это так называемая статистика Бозе — Эйнштейна. Ей подчиняются, в частности, фотоны.

Для частиц с полуцелым спином выполняется принцип Паули, согласно которому в данном состоянии не может находиться более одной частицы. Поэтому кратность состояния для них равна

$$\Omega(n_1, n_2, \dots, n_k) = \begin{cases} 1, & \text{если все } n_i \leq 1, \\ 0, & \text{если хотя бы одно } n_i > 1. \end{cases}$$

Для этих частиц справедлива совсем другая статистика, статистика Ферми — Дирака. Ей подчиняются электроны, протоны, нейтроны и т. д.

Таким образом, вследствие тождественности частиц имеются две разные квантовые статистики, сильно различающиеся по своей форме, но одинаковые по своим общим методам.

После создания квантовой статистики ряд неясных вопросов, о которых упоминалось ранее, получил наконец решение. Была построена теория электропроводности и теплоемкости металлов, теория ферромагнетизма и т. д. В настоящее время квантовая теория равновесных процессов построена в столь же законченной форме, как и классическая.

Кроме того, заложены основы квантовой статистической теории неравновесных процессов. Эта теория является обобщением классической статистической теории необратимых процессов на случай, когда для поведения системы существенны квантовые эффекты. Уравнение, описывающее неравновесные процессы в квантовой системе, носит название основного кинетического уравнения. Оно позволяет в принципе проследить за эволюцией во времени вероятности того, что система находится в определенном состоянии, характеризуемом полным набором квантовых чисел (вероятность заполнения квантового состояния). Интегрируя основное кинетическое уравнение по всем переменным (квантовым

числам), кроме набора одночастичных переменных, можно получить квантовые кинетические уравнения того же типа, что и классическое уравнение Больцмана.

Для всего нашего исследования сравнение отношения квантовой механики к квантовой статистике, с одной стороны, и классической механики к классической статистике, с другой, имеет первостепенное значение. Анализ этих соотношений дает главный аргумент против глубоко укоренившегося представления о том, что основным вопросом в исследовании соотношения динамических и статистических законов физики является исследование отношения динамических законов поведения отдельных частиц к статистическим законам поведения их совокупности. С появлением квантовой статистики стало очевидным, что *соотношение между законами поведения индивидуальных объектов и законами поведения больших их совокупностей совсем не обязательно совпадает с соотношением динамических и статистических законов*. Связь между квантовой механикой и квантовой статистикой в принципе та же, что и между классической механикой и классической статистикой, хотя обе первые теории относятся к статистическим. В дальнейшем при выяснении различных аспектов исследуемой проблемы мы проведем более детальное обсуждение.

§ 13. Возникновение релятивистской квантовой механики

Скорости движения частиц микромира огромны и часто близки к скорости света. Поэтому при построении квантовой механики с самого начала пытались строить теорию, уравнения которой были бы инвариантны относительно преобразований Лоренца. Уже первые соотношения де Бройля для свободного электрона имели релятивистскую форму.

Шредингер одновременно со своим знаменитым нерелятивистским уравнением написал также (но не опубликовал) релятивистское уравнение, которое впоследствии было независимо предложено Клейном, Фоком и Гордоном. Сейчас его обычно называют уравнением Клейна — Гордона — Фока.

Квантовая механика фотонов не может не быть релятивистской, так как фотоны всегда движутся со скоростью света. Тем не менее, хотя создание квантовой тео-

рии началось с попыток построения именно релятивистской теории и открытие хотя корпускулярных света явилось одним из первых фактов, легших в основу всей квантовой теории, сначала все же была построена нерелятивистская квантовая механика движения электронов.

В конце концов, это связано с тем, что нерелятивистская теория значительно проще релятивистской как по своему формальному аппарату, так и по физическому его истолкованию. Последнее обстоятельство немаловажно при развитии столь сложной теории, как квантовая механика, интерпретация которой даже в нерелятивистском случае до сих пор порождает острые дискуссии.

Основная трудность формулировки релятивистской квантовой теории по сравнению с нерелятивистской заключается в том, что при релятивистских энергиях, т. е. при энергиях частиц, превосходящих энергию покоя m_0c^2 , число частиц перестает быть постоянным. В результате только приближенно, в так называемом квазирелятивистском приближении, можно рассматривать частицу как строго определенную индивидуальность.

В частности, при переходе к релятивистскому описанию существенно меняется понятие координаты частицы. В отличие от нерелятивистской теории, локализация частицы в пространстве со сколь угодно большой точностью становится невозможной. Локализация частицы в пространстве протяженностью порядка комптоновской длины волны $\lambda_k = \hbar/m_0c$ приводит к сообщению ей, в соответствии с принципом неопределенности, энергии порядка $2m_0c^2$ и, следовательно, к образованию пар частица — античастица.

Релятивистское уравнение Клейна — Гордона — Фока можно записать по аналогии с уравнением Шредингера, но только вместо классического соотношения между энергией и импульсом свободной частицы $E = p^2/(2m)$ следует использовать релятивистское выражение $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$. Соответствующее уравнение для скалярной функции Ψ будет содержать, в отличие от уравнения Шредингера, вторую производную по времени. Это приводит к тому, что величина

$$\frac{i\hbar}{2m_0c^2} \left(\Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \Psi \frac{\partial \Psi^*}{\partial t} \right),$$

аналогичная плотности вероятности в нерелятивистской теории, перестает быть положительно определенной.

Именно по данной причине Шредингер не опубликовал сразу своей работы, посвященной выводу этого уравнения, и длительное время считалось, что оно не способно описывать реальные процессы. Лишь через несколько лет было показано, что уравнение Клейна — Гордона — Фока следует рассматривать как уравнение классического типа для поля, которому соответствуют частицы нулевого спина (π -мезоны в первую очередь), подобно тому как классические уравнения Максвелла являются уравнениями для электромагнитного поля, которому соответствуют фотоны.

Первым релятивистски инвариантным уравнением, которое получило полное признание и было детально исследовано, явилось уравнение Дирака, предложенное им в 1927 г. Дирак стремился получить уравнение, содержащее лишь первую производную по времени, с тем, чтобы волновой функции можно было придать тот же смысл, что и в обычной теории Шредингера. Симметрия пространственных координат и времени, характерная для теории относительности, требовала, чтобы производные по координатам в уравнении также были первого порядка. Дирак понял, что записать подобное уравнение для одной скалярной волновой функции невозможно. Квантовое релятивистское движение электрона описывается четырьмя связанными друг с другом уравнениями, и состояние его характеризуется волновой функцией, имеющей четыре компоненты, т. е.

$$\Psi = \begin{vmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \end{vmatrix}.$$

Компоненты волновой функции ψ_i обладают совершенно особыми трансформационными свойствами. При переходе от одной системы отсчета к другой они преобразуются как компоненты тензора половинного ранга — спиноры.

При анализе уравнения Дирака выяснилось, что оно автоматически приводит к существованию у электрона незадолго перед тем открытого собственного момента импульса — спина. Полученное уравнение описывает движение частиц со спином $1/2 \hbar$. Наличие четырехкомпонентной функции связано с тем, что возможны состоя-

ния электрона с проекциями спина $+\frac{1}{2}\hbar$ и $-\frac{1}{2}\hbar$, а также состояния с положительной и отрицательной энергиями.

Сначала трудно было понять, какой смысл может иметь состояние свободной частицы с отрицательной энергией и, следовательно, массой. Если бы переходы из состояния с положительной энергией в состояние с отрицательной энергией были запрещены, то никаких трудностей не возникало бы. Но квантовая механика не может запретить подобные переходы.

Дирак преодолел трудности с помощью так называемой «теории дырок». Согласно этой теории все возможные состояния с отрицательной энергией уже заполнены электронами и переходы в такие состояния запрещены принципом Паули. Если один из электронов отрицательного фона перейдет в состояние с положительной энергией, то оставшееся незаполненным состояние с отрицательной энергией проявляет себя как частица с положительной энергией и с зарядом, противоположным по знаку заряду электрона, т. е. положительным. Таким образом, теория, описывающая даже один электрон, должна учитывать состояния с отрицательными энергиями, и, по существу, «теория дырок» — это теория многих, собственно говоря, бесконечно многих частиц.

Итак, дырка соответствует электрону с положительным зарядом — позитрону. Столкновению электрона с позитроном в этой теории соответствует переход электрона на вакантное место в состоянии с отрицательной энергией, сопровождающийся рождением двух фотонов большой частоты, и, наоборот, фотон большой энергии в поле ядра может породить пару электрон — позитрон.

Таким образом, теория Дирака предсказывала существование новой частицы — позитрона, открытого в 1932 г. в космических лучах. Еще важнее, что теория устанавливала общий факт существования частиц-двойников. Позитрон является античастицей электрона.

Первоначальная «теория дырок» Дирака приводит к трудностям, связанным с бесконечной плотностью электрического заряда в состояниях с отрицательной энергией. Появление таких трудностей, очевидно, обусловлено тем, что в теории Дирака делается попытка описать процессы с переменным числом частиц на языке квантовых переходов одной частицы. Это явно непосле-

довательно. В современной формулировке теории (квантовой электродинамике), о которой пойдет речь ниже, существует полная симметрия между электронами и позитронами. Как электронным, так и позитронным состояниям соответствует положительная энергия. Дираковский отрицательный фон оказывается не более чем наглядной картиной, позволяющей простым образом разобратся в превращениях электронно-позитронных пар. Никакой реальности состояниям с отрицательной энергией придавать не следует.

Некоторое время считалось, что уравнение Дирака — это единственное релятивистское квантовое уравнение для частиц, обладающих массой покоя. Лишь после того, как выяснилось, что уравнение Клейна — Фока — Гордона является релятивистски инвариантным уравнением для частиц со спином нуль, стала ясна неправильность такого представления.

Однако уравнение Дирака по-прежнему имеет важнейшее значение. Оно описывает движение не только электронов, но и любых частиц с полуцелым спином ($1/2 \hbar$). Большинство же стабильных и метастабильных частиц (частиц со временем жизни, значительно превышающим характерное время сильных взаимодействий, по порядку величины равное 10^{-23} сек) имеет именно такое значение спина. Кроме электронов спин $1/2 \hbar$ имеют μ -мезоны, нейтрино, протоны, нейтроны и многочисленная группа гиперонов. У всех этих частиц существуют соответствующие античастицы.

Одна из замечательнейших особенностей релятивистской квантовой механики состоит в том, что данному типу элементарной частицы в этой теории соответствует свой тип уравнения. Основной величиной, определяющей тензорную размерность волновой функции (т. е. ее трансформационные свойства), является спин. Если частицам с полуцелым спином соответствует спинорное уравнение Дирака, а с нулевым спином — уравнение Клейна — Фока — Гордона для скалярной (точнее, псевдоскалярной *) волновой функции, то частицам с целым спином соответствует уравнение для векторной волновой функции.

*) Псевдоскаляр отличается от скаляра тем, что при пространственном отражении он меняет знак.

Единственной стабильной частицей, обладающей целым спином, равным \hbar , является частица с нулевой массой покоя — фотон. При построении теории движения фотонов за основу берутся уравнения Максвелла в обычной форме. Волновые свойства фотонов можно учесть соотношением $E = \hbar\omega$, связывающим энергию фотона E и его частоту ω . Уравнений Максвелла вместе с этим соотношением совершенно достаточно для построения теории движения фотонов.

Надо заметить, что напряженности электромагнитного поля не являются волновой функцией в квантовомеханическом смысле. Но можно ввести векторную величину, связанную с напряженностями электрического поля \mathbf{E} и магнитного поля \mathbf{H} , которая служит аналогом волновой функции электрона в квантовой механике. Для нее можно записать уравнение типа уравнения Шредингера. Однако лишь в импульсном представлении эта величина (точнее, квадрат ее модуля) имеет смысл вероятности обнаружения фотона с определенным значением импульса. Волновой функции для фотона в обычном смысле (в координатном представлении) не существует. Дело в том, что вероятность обнаружения фотона, в отличие от электрона, в определенной области пространства зависит от длины волны. Понятие же длины волны в точке лишено смысла. Иными словами, фотон нельзя локализовать в области, меньшей длины его волны. В этом отношении он менее напоминает корпускулу, чем электрон и другие частицы, обладающие массой покоя. Теория позволяет лишь вычислить вероятность поглощения или излучения фотона атомом, расположенным в данной области пространства.

Квантовая теория движения фотонов, так же как и других элементарных частиц, имеет статистический характер. Лишь при переходе к классическому пределу, когда в процессах участвует очень большое число фотонов, вероятность практически превращается в достоверность и законы электромагнитного поля приобретают динамический характер *).

*) Надо отметить, что классическая трактовка поля при большом числе частиц возможна только тогда, когда частицы имеют целый спин и подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна. Справедливость принципа Паули для частиц с полуцелым спином, например, для электронов, делает невозможной классическую трактовку электронного поля, тогда как классическая трактовка электромагнитного

Частицы с нулевым спином (в первую очередь π -мезоны) описываются, как уже говорилось, уравнением Клейна — Фока — Гордона. Этому уравнению, как и уравнениям Максвелла, можно придать корпускулярную интерпретацию.

§ 14. Квантовая электродинамика

Начиная с 20-х годов XX века, после создания нерелятивистской квантовой механики, все дальнейшее развитие физики микромира шло под флагом квантовых теорий статистического характера. Наиболее глубокие открытия были сделаны именно здесь, в физике элементарных частиц.

Победное шествие статистических законов, начавшееся во второй половине XIX века, привело к тому, что динамические законы совершенно утратили былое значение основного, а порой и единственного метода исследования фундаментальных процессов природы.

Построение квантовой теории полей — хотя и далеко не завершенное — это последний на сегодняшний день этап в развитии самых глубоких, самых фундаментальных представлений о природе. Здесь физики вплотную подошли к решению вопроса: в каких не расчленимых уже далее формах может существовать материя?

Нельзя считать, что обычная квантовая механика, даже в ее релятивистской форме, о которой у нас шла речь, охватывает все многообразие процессов микромира. Более того, она не вполне последовательна. Трактровка взаимодействия в одночастичной теории оставалась, по существу, классической и, соответственно, имеющей динамический характер. Движение квантовой частицы, например электрона в атоме водорода, рассматривалось как движение в классическом кулоновском поле. Теория не могла дать последовательного описания такому важнейшему процессу, как излучение света атомами.

Суть дела в том, что обычная квантовая механика описывала системы с неизменным числом частиц и только

поля имеет смысл. Это связано с тем, что операторы рождения и уничтожения квантов электромагнитного поля, о которых будет сказано в дальнейшем, при числе частиц $N \gg 1$ коммутируют друг с другом и, следовательно, ведут себя как обычные классические величины. Операторы же рождения и уничтожения частиц, подчиняющихся принципу Паули, всегда антикоммутируют, и для них при $N \gg 1$ нет предельного перехода к классическим соотношениям.

для таких систем она представляла собой стройную, логически замкнутую теорию. В действительности же число частиц в системах не остается постоянным, особенно при высоких энергиях.

Более того, процессы рождения, уничтожения и превращения части имеют фундаментальное значение для микромира. Именно непрерывное испускание и поглощение одних частиц другими является основной формой «жизнедеятельности» микрообъектов, приводящей к взаимодействию между ними.

Следующий этап в развитии квантовой теории состоял в распространении квантовых методов на системы с переменным числом частиц и в новом, соответственно, подходе к трактовке их взаимодействия. При развитии теории взаимодействия частиц путем обмена квантами поля-посредника были изжиты существенно классические черты теории микропроцессов.

Новая теория, получившая вначале название метода вторичного квантования (сейчас предпочитают ее называть квантовой теорией поля), была первоначально развита применительно к взаимодействию электронов, позитронов и фотонов. В то время (конец 20-х годов) были известны, помимо гравитации *), только электромагнитные силы. Поэтому, естественно, прежде всего была построена квантовая электродинамика.

Суть нового этапа развития теории состоит в том, что наряду с операторами энергии, импульса и т. д., представляющими в обычной квантовой механике эти величины, вводятся операторы рождения и уничтожения частиц, причем старые волновые функции в одном из представлений теории являются такими операторами. Если на первом этапе построения теории процесс квантования состоял в замене физических величин операторами, то теперь сами волновые функции становятся операторами. Отсюда и название метода — метод вторичного квантования.

Наиболее просто можно дать понятие о сущности теории, если воспользоваться описанием процессов в конфигурационном пространстве (пространство Фока). Это описание является одним из возможных представлений

*) Гравитационные силы, предположительно, не играют сколько-нибудь существенной роли в микромире из-за своей крайне малой величины.

теории, выгодно отличающимся от других большей наглядностью. Состояние системы характеризуется не одной волновой функцией для фиксированного числа частиц, а функционалом, представляющим собой совокупность волновых функций, каждая из которых определяет вероятность того, что система состоит из известного числа частиц с заданным распределением вероятностей их обнаружения в различных областях пространства.

Таким образом, на новом этапе развития теории *вероятностные законы определяют не только значение координат, импульсов, энергии и других величин, но и само число частиц*. При столкновении, к примеру, частиц высокой энергии число рожденных частиц не определяется однозначно начальными состояниями сталкивающихся микрообъектов.

Оператор рождения частиц, действуя на функционал Фока, увеличивает число частиц на единицу в каждом состоянии; оператор уничтожения, напротив, уменьшает его на единицу. Теория не вскрывает «механизма» рождения, уничтожения и превращения частиц. Любой процесс в ней рассматривается как уничтожение одних частиц в определенном состоянии и появление других в новых состояниях.

В основе теории лежит представление о свободном электромагнитном поле (в отсутствие зарядов) и, соответственно, свободном электронно-позитронном поле, не взаимодействующем с электромагнитным.

Квантованное электромагнитное поле рассматривается как совокупность частиц — фотонов. Соответственно энергия электромагнитного поля записывается в форме

$$W = \sum_{k=1}^{\infty} (n_k + 1/2) \hbar \omega_k,$$

где n_k — число фотонов с энергией $\hbar \omega_k$.

Состояние с наименьшей энергией называется вакуумным и играет во всей теории очень важную роль.

Вакуум в квантовой теории — совсем не безликое ничто. Число частиц (фотонов) n_k в вакуумном состоянии равно нулю, но это совсем не означает, что электромагнитного поля нет. Существуют так называемые нулевые колебания поля флуктуационного характера, энер-

гия которых W_0 равна $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2} \hbar \omega_k$. Так как число степеней свободы поля бесконечно велико, то и энергия нулевых колебаний тоже бесконечна, но ее нельзя просто отбросить, как лишнюю физическую смысла. Квантовые флуктуации поля неустранимы, и при взаимодействии электромагнитного поля с заряженными частицами они приводят к эффектам, наблюдаемым экспериментально. Мы об этом будем говорить в дальнейшем.

Пока следует подчеркнуть одно обстоятельство, очень существенное для всей интересующей нас проблемы. Теория приводит, в согласии с экспериментом, к выводу, что *в природе не только не существует абсолютно пустого пространства, где нет полей, но не существует участков пространства, в которых не происходили бы флуктуационные изменения электромагнитного поля. Достаточно обратить внимание на вакуумные флуктуации поля, и сразу же станет понятным, что динамические законы движения частиц могут выполняться только приближенно. Для их выполнения требуется по крайней мере такое приближение, при котором этими флуктуациями можно пренебречь.*

При квантовании свободного электронно-позитронного поля получаются сходные результаты. В частности, наряду с вакуумным состоянием электромагнитного поля существует электронно-позитронный вакуум, которому также соответствует бесконечная энергия.

Рассмотрение взаимодействия фотонов с электронами и позитронами из-за бесконечного числа степеней свободы у поля приводит к задачам, которые нельзя решить точно. Однако в теории электромагнитных взаимодействий это не создает безвыходного положения. Любую задачу можно решить приближенно, если рассматривать взаимодействие полей как малое возмущение свободного состояния. Это допустимо, так как безразмерная величина $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$, характеризующая взаимодействие, значительно меньше единицы *).

*) В первом порядке член взаимодействия пропорционален произведению $\alpha \lambda_0$, где $\lambda_0 = \frac{\hbar}{m_0 c}$ — комптоновская длина волны электрона. Поэтому в первом приближении взаимодействие можно описать классической электродинамикой Максвелла, не содержащей \hbar . Только поправки второго порядка по α органически содержат \hbar .

Решение любой задачи ищется методом теории возмущений в виде разложения по степеням α . Взаимодействие приводит к изменению числа частиц, их энергий, импульсов и т. д. в невозмущенном состоянии. Все результаты, полученные в первом приближении, хорошо согласуются с экспериментом. Первое приближение описывает процессы, в которых участвуют один фотон и два электрона (электрон в начальном и конечном состоянии рассматривается как две различные частицы), а именно излучение фотона электроном или позитроном, а также рождение или аннигиляцию пар.

Все процессы квантовой теории поля могут быть представлены наглядно с помощью диаграмм Фейнмана, на которых обычно электрон или позитрон изображается сплошной линией, а фотон — пунктирной. Процессы первого порядка изображаются диаграммой с одной вершиной (рис. 1). Вершине A соответствует точка, в которой произошло взаимодействие. Теория позволяет вычислить вероятность этого взаимодействия.

Надо сказать, что процессы подобного рода для свободных частиц реально протекать не могут, так как они

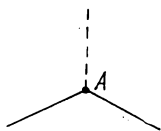


Рис. 1.

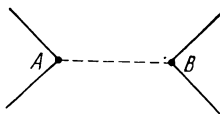


Рис. 2.

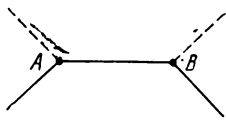


Рис. 3.

не удовлетворяют одновременно законам сохранения энергии и импульса. Но во внешнем поле, например в поле ядра, они идти могут.

Процессы второго порядка, пропорциональные α^2 , описывают рассеяние фотонов электронами, рассеяние электронов друг на друге (фактически процесс взаимодействия электронов), рождение пар двумя фотонами, аннигиляцию с рождением пары гамма-квантов и др.

Все эти процессы рассматриваются в теории как переход из начального состояния в конечное **не непосредственно**.

Сначала система переходит в некоторое промежуточное состояние, а затем уже из него в конечное. С помощью

диаграмм Фейнмана процессы второго порядка можно изобразить графиками двух типов с двумя вершинами.

На одной диаграмме (рис. 2) в промежуточном состоянии находится фотон (линия AB), на другой (рис. 3) — электрон. Первая диаграмма описывает процесс взаимодействия заряженных частиц, суть которого состоит в том, что одна частица испускает фотон, переходя в новое состояние, а вторая его поглощает. Взаимодействие частиц сводится, таким образом, к непрерывному обмену фотонами. В этом состоит перевод на квантовый язык классической концепции близкодействия Фарадея — Максвелла.

Диаграмма, изображенная на рис. 3, описывает, в частности, процесс рассеяния фотона на электроне. В вершине A происходит поглощение фотона, а в B рождается новый фотон и электрон переходит в конечное состояние. Та же диаграмма описывает аннигиляцию или рождение пары с участием двух фотонов в конечном или начальном состоянии.

Самое примечательное в механизме этих процессов состоит в том, что излучение или поглощение фотона свободным электроном может происходить только с нарушением в определенном смысле закона сохранения энергии*). Такого рода процессы принято называть *виртуальными*. Частицы в промежуточном состоянии также называются виртуальными. Виртуальным частицам соответствуют внутренние линии диаграмм Фейнмана, а реальным концевые линии, изображающие частицы в начальных и конечных состояниях.

Не следует думать, что виртуальные процессы и состояния появляются вследствие несовершенства всей теории в целом или же вследствие приближенного метода вычислений в теории возмущений и никакого отношения к реальной действительности не имеют. Такой вывод был бы неизбежен в классической физике с характерным для нее динамическим характером всех связей, но не в квантовой. Ведь в квантовой механике энергия определена в интервале времени τ в соответствии с принципом неопределенности с точностью $\Delta E \tau \gtrsim \hbar$.

Имеется статистический разброс значений энергии. В силу этого можно рассматривать виртуальные процессы

*) Указанные процессы второго порядка идут между свободными частицами в отсутствие каких-либо внешних полей.

как протекающие вполне реально, но считать справедливым закон сохранения энергии в той же мере, в какой выполнение соотношения неопределенностей $\Delta E \geq \hbar/\tau$ не означает нарушения этого закона. Виртуальные процессы осуществляются за очень малое время. Для электромагнитных процессов это время порядка 10^{-21} сек (характерное время электромагнитных процессов).

Согласно квантовой электродинамике вероятность излучения свободным электроном фотона отлична от нуля при малых интервалах времени. При стремлении временного интервала к бесконечности вероятность этого процесса строго равна нулю *).

Таким образом, термин «виртуальный» **) можно рассматривать как эквивалентный термину «промежуточный» и не считать, что виртуальные частицы менее реальны, чем обычные, как это часто делается.

Если заряженной частице сообщить энергию извне, то виртуальные фотоны могут превратиться в реальные и будет зарегистрирован факт рождения новых частиц — излучение света ***).

Рассматривая взаимодействие, мы пока не касались так называемых вакуумных эффектов.

Нулевые колебания электромагнитного поля оказывают определенное воздействие на движение электронов, что приводит к необходимости введения специфических радиационных поправок в значения энергии, магнитного момента и т. д. Вместе с тем реальное электромагнитное поле возмущает нулевые колебания электронно-позитронного поля, которые можно рассматривать как процесс образования и аннигиляции виртуальных электронно-позитронных пар. Поле заряженной частицы перераспределяет определенным образом виртуальные пары, что ведет к частичной экранировке заряда, подобной той, которая возникает при помещении заряда в диэлектрик вследствие поляризации последнего. Поэтому эффект экранировки заряда виртуальными парами носит название поляризации вакуума. Поляризация вакуума, как и

*) Физический смысл виртуальных процессов более подробно рассмотрен в статье [14].

**) Заметим, что в классической механике термин «виртуальные» применительно к перемещениям имеет совсем иной смысл, чем в квантовой теории. В классической механике «виртуальные» означает возможные, допустимые связями перемещения.

***). Подробнее о виртуальных частицах и процессах пойдет речь в гл. V.

взаимодействие с нулевыми колебаниями электромагнитного поля, приводит к поправкам в значениях энергии атомных электронов и т. д.

Поляризация вакуума обуславливает существенно нелинейный электродинамический эффект, а именно рассеяние света на свете в вакууме. Правда, эффект этот настолько мал, что экспериментально он пока не обнаружен.

Учет радиационных поправок и поправок, вызванных поляризацией вакуума, вообще говоря, необходим при расчете любого эффекта, причем взаимодействие частицы с вакуумом мы можем рассматривать как взаимодействие частицы самой с собой, как самодействие. Ведь, кроме исследуемой частицы, других реальных частиц при этом нет.

Радиационным поправкам соответствует испускание и поглощение частицей виртуальных фотонов. На диаграммах Фейнмана этому отвечает появление двух дополнительных вершин, связанных пунктирной линией, изображающей фотон (рис. 4). Виртуальному образованию

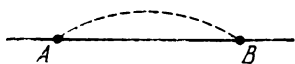


Рис. 4.

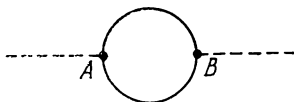


Рис. 5.

пары электрон — позитрон также соответствуют две дополнительные вершины (рис. 5).

Учет вакуумных эффектов позволил объяснить экспериментально наблюдаемое расщепление первого возбужденного уровня атома водорода (без учета вакуумных эффектов должно наблюдаться вырождение и уровень оказывается нерасщепленным) и аномальное значение магнитного момента электрона. Теория дает полное согласие с опытом в пределах точности эксперимента. Именно это заставляет признать реальность вакуумных эффектов.

Однако положение в теории далеко не благополучно. Дело в том, что при непосредственном расчете поправок второго порядка по α , связанных с виртуальным рождением фотонов и электронно-позитронных пар, получаются расходящиеся интегралы. Собственная энергия электрона, обусловленная взаимодействием с вакуумом электромагнитного поля (самодействие), и собственная энергия

фотона, обусловленная взаимодействием с электронно-позитронным вакуумом, оказываются бесконечно большими. Точно так же оказывается бесконечно большой плотность электрического заряда виртуальных пар, экранирующих в вакууме реальный заряд.

Почти 20 лет было потрачено на преодоление этих трудностей при расчетах эффектов второго порядка. Лишь в 1948 г. были найдены методы их устранения.

Формальная причина появления бесконечностей состоит вот в чем. В промежуточных состояниях, соответствующих процессам второго порядка и изображенных на диаграммах рис. 2 и 3, виртуальная частица имеет строго определенный импульс, задаваемый импульсами реальных частиц в начальном и конечном состояниях. На диаграммах же рис. 4 и 5 импульс виртуального фотона и виртуальной пары может быть любым. На концевых линиях импульсы имеют определенную величину, но в точках *A* диаграмм рис. 4 и 5 электрон может породить фотон с любым импульсом, переходя в новое состояние, а фотон может породить пару с импульсами любой величины. После этого фотон или пара поглощается, и в конечном состоянии импульс реальной частицы оказывается равным начальному. Испускание виртуальных фотонов и пар с большими импульсами и, соответственно, с большими энергиями приводит к появлению расходящихся интегралов.

Таким образом, современная теория не способна правильно описать взаимодействие электронов и фотонов большой энергии. В чем здесь дело, сказать с полной определенностью нельзя. Впоследствии мы обсудим возможные причины появления расходимостей.

Однако как же удастся, учитывая вакуумные поправки, получать конечные результаты, согласующиеся с опытом? Это достигается с помощью так называемой техники перенормировки заряда и массы, техники, которая позволяет выделить из бесконечно больших величин конечную часть, дающую добавку в точном соответствии с экспериментом.

Исходными в теории, как уже говорилось, являются свободные, ни с чем не взаимодействующие поля (или частицы), например, электрон, лишенный своего окружения — электромагнитного поля. Часто такие частицы называют голыми. Голым частицам приписывают некоторые значения массы m' и заряда e_0 . Это так называ-

ёмые затравочныя масса и заряд. Истинное значение массы частицы определяется и m' , и той добавкой δm , которая вызвана взаимодействиями с собственным электромагнитным полем, т. е. $m = m' + \delta m$. Аналогично, истинное значение заряда $e = \sqrt{Z} e_0$, где Z — экранирующий фактор, обусловленный поляризацией вакуума. Расходимости возникают потому, что δm и Z в современной теории оказываются бесконечно большими. Очень важно отметить здесь, что все бесконечности в теории электромагнитных взаимодействий сводятся к указанным двум типам. Других нет.

При расчете эффектов второго и высших порядков в конечный результат входят только m и e , но он никогда не содержит m' , δm и e_0 , Z в отдельности. Поэтому можно рассуждать так: мы пока не умеем вычислять вакуумные поправки к массе и заряду, не можем теоретически определять m и e , но экспериментальные их значения хорошо известны. Если в конечный результат любого расчета вместо даваемых теорией бесконечных значений подставить эмпирические величины m и e , то все члены ряда теории возмущений будут конечными. Этот процесс замены отсепарированных бесконечностей конечными значениями и называется перенормировкой. Такая процедура возможна не для любых типов взаимодействий; не для любого поля квантовая теория оказывается перенормируемой.

Итак, налицо поразительная ситуация. С одной стороны, теория приводит к явно бессмысленным результатам — бесконечностям. Но, с другой стороны, учет малой части этих бесконечностей дает превосходное согласие с опытом.

Не известен ни один экспериментальный факт в области взаимодействия электрически заряженных частиц, который не был бы объяснен теорией количественно, причём с громадной точностью. Так, поправка к магнитному моменту электрона $\epsilon = \alpha/2\pi = 1,312 (\alpha/2\pi)^2$, вычисленная теоретически, обеспечивает совпадение с экспериментальным значением с ошибкой, меньшей 10^{-8} .

Статистическая теория дает высокую степень точности, не достижимую ни в одной динамической теории. Именно, при изучении оптических спектров атомов, а в еще большей степени при исследовании ядерных спектров (эффект Мессбауэра) получается непревзойденная точность согласия опыта и теории. Ряд эффектов сейчас

рассчитан с точностью, превосходящей современные экспериментальные возможности. Но никто не сомневается, что когда можно будет поставить более точные эксперименты, то их результаты тоже совпадут с предсказаниями теории.

Следует отметить, что причина высокой точности экспериментальных результатов при изучении таких квантовых систем, как атом, состоит в малости внешних воздействий, не способных изменить состояние квантовой системы из-за дискретности ее энергетических уровней.

§ 15. Слабые взаимодействия

Следующий этап в развитии квантовой теории поля — применение разработанных в квантовой электродинамике методов для расчета процессов неэлектромагнитной природы, т. е. процессов, в которых главную роль играют особые типы взаимодействий, отличные от электромагнитных, — слабые и ядерные (или сильные) взаимодействия.

Общие принципы теории здесь остаются теми же, что и в квантовой электродинамике. Однако количественная теория слабых и ядерных взаимодействий, по существу, не построена. Наряду с трудностями, встречающимися в теории электромагнитных взаимодействий (бесконечности и т. д.), возникают новые специфические трудности, не преодоленные и по сей день. Количественные предсказания теории, если их вообще можно сделать, зачастую отличаются от экспериментальных значений на один-два порядка.

Впервые методы квантовой теории электромагнитных взаимодействий применил к новому типу взаимодействий Ферми в 1934 г. Процесс испускания ядром электрона и нейтрино, фактически сводящийся к превращению нейтрона в протон с испусканием электрона и нейтрино (точнее, антинейтрино), Ферми предложил считать аналогичным процессу испускания фотонов заряженными частицами, но вызывающимся силами, которые примерно в 10^{11} раз слабее электромагнитных.

Фундаментальным процессом в теории Ферми является виртуальное испускание нейтроном пар электрон — антинейтрино с превращением в протон. При поглощении протоном электрона и антинейтрино вновь

образуется нейтрон. Характерное время этого процесса, служащее мерой силы взаимодействия, порядка 10^{-9} сек. Так как сумма масс покоя протона, электрона и антинейтрино (у антинейтрино масса покоя вообще равна нулю) меньше массы покоя нейтрона, то этот процесс может идти реально. Свободный нейтрон действительно распадается в среднем за 17 мин. Причина стабильности нейтронов внутри большинства ядер не имеет статического характера: она связана с непрерывными превращениями нейтронов и протонов друг в друга при ядерных взаимодействиях.

Главное, что выяснилось спустя примерно 15 лет после первых работ Ферми, состоит в следующем: слабые взаимодействия носят универсальный характер. К ним относятся все взаимодействия с участием нейтрино и все взаимодействия, меняющие квантовое число «странность» *). Вообще говоря, слабые взаимодействия присущи всем элементарным частицам. Но в тех случаях, когда процесс протекает за счет электромагнитных или сильных ядерных взаимодействий, слабыми взаимодействиями при тех энергиях, с которыми имеют дело современные экспериментаторы, с полным основанием можно пренебречь. Нейтрино же не испытывает никаких взаимодействий, кроме слабого, если не говорить о действии еще более слабых гравитационных сил. Именно поэтому все процессы, связанные с нейтрино, обусловлены слабыми взаимодействиями, и их изучение наилучшим образом проливает свет на характер взаимодействий такого типа.

Значение слабых взаимодействий в процессах с изменением странности определяется следующим обстоятельством: это квантовое число сохраняется при ядерных и электромагнитных взаимодействиях и может меняться лишь при слабых.

Слабые взаимодействия при тех энергиях, которые можно получить с современными ускорителями, практически не оказывают влияния на движение частиц. Единственное, в чем они себя проявляют, — это распады (и другие превращения) элементарных частиц. Именно

*) Квантовое число «странность» было введено для объяснения рождения пар и аномально больших времен жизни странных частиц — K -мезонов и гиперонов. Именно эти частицы имеют странность, отличную от нуля. У нуклонов и π -мезонов она равна нулю. Подробно об этом будет сказано в дальнейшем.

они обуславливают распад всех относительно стабильных частиц с временами жизни, значительно превышающими 10^{-23} сек. Исключение составляют распады π^0 -мезона на два γ -кванта и Σ^0 -гиперона на Λ^0 -частицу и γ -квант. Эти процессы не связаны с нейтрино и изменением странности и протекают в результате электромагнитных взаимодействий. Распад μ^\pm -мезонов, π^\pm , K^0 -, K^\pm -мезонов и всех гиперонов (относительно стабильных частиц с массой, большей массы нуклона),

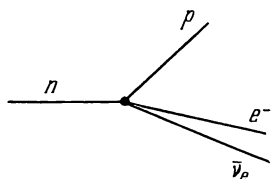


Рис. 6.

кроме Σ^0 -гиперона, вызван слабыми взаимодействиями *). Поэтому они часто называются распадными взаимодействиями или силами.

Константа слабых взаимодействий и сам их характер (лагранжиан взаимодействия) одинаковы для всех перечисленных выше распадов. Именно в этом состоит универсальный характер слабых взаимодействий, установленный в последние годы.

Согласно общепринятому сейчас утверждению в слабых взаимодействиях должны участвовать четыре частицы с полуцелым спином, часто называемые фермионами. В случае распада, например, нейтрона и μ -мезона это очевидно; в самом деле,

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad \text{и} \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.$$

Диаграмма Фейнмана для распада нейтрона изображена на рис. 6. Здесь в одной точке, вершине диаграммы, взаимодействуют четыре фермиона **).

В случае же распада, к примеру, π^\pm -мезонов ($\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$) или Λ^0 -гиперона ($\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$) картина становится гораздо сложнее. Исходя из идеи универсальности слабых взаимодействий, следует предположить, что в этих реакциях в промежуточном состоянии виртуально возникает пара нуклон — антинуклон, ко-

*) Слабые взаимодействия ответственны также за захват ядром μ -мезонов и электронов (K -захват).

**) ν_μ — мюонное нейтрино, рождающееся в паре с μ -мезоном. Нейтрино ν_e , рождающееся одновременно с электроном, называют электронным нейтрино. Эти нейтрино, как доказано прямыми опытами, не тождественны.

торая затем аннигилирует. Нужно считать, что реакция распада π^+ -мезона происходит в два этапа. На первом этапе π^+ -мезон превращается виртуально в пару протон — антинейтрон в результате сильных взаимодействий, из которой затем вследствие слабых четырехфермионных взаимодействий образуются μ^+ -мезон и ν_μ (мюонное нейтрино) или позитрон и электронное нейтрино. Диаграмма Фейнмана для этого процесса показана на рис. 7.

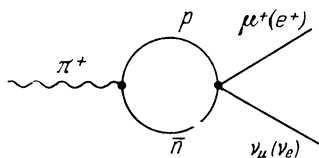


Рис. 7.

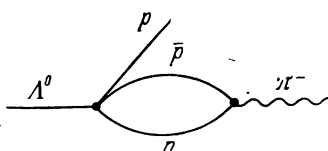


Рис. 8.

При распаде Λ^0 -частицы она за счет слабых взаимодействий превращается виртуально в протон и пару нейтрон — антипротон с изменением странности. Затем пара аннигилирует с испусканием π^- -мезона (рис. 8). Конечные продукты реакции — протон и π^- -мезон.

Существенно, что слабые взаимодействия нарушают не только постоянство квантового числа — странности, но и зеркальную симметрию природы, т. е., говоря квантовым языком, приводят к несохранению четности. В процессах с участием нейтрино это связано с тем, что излучаемые при слабых взаимодействиях нейтрино и антинейтрино имеют различные закрученности. Нейтрино закручено так, что направление его вращения составляет левый винт с направлением движения, а у антинейтрино направление вращения составляет правый винт с направлением движения. В результате в процессах с участием нейтрино нарушается зеркальная симметрия: происходящий в природе процесс выглядит иначе, чем его отражение в зеркале. Симметрия сохраняется, если одновременно с зеркальным отражением заменить все частицы на античастицы. Сохраняется, как говорят, комбинированная четность.

Несохранение четности и странности — наиболее характерные черты процессов, происходящих в результате слабых взаимодействий.

В настоящее время на основе недавно установленных экспериментально фактов несохранения четности и суще-

ствования двух типов нейтрино создана весьма удовлетворительная количественная теория слабых взаимодействий, в которых не участвуют странные частицы. Хорошо известно, как вычислять эффекты в первом приближении теории возмущений. Правда, в отличие от квантовой электродинамики нельзя вычислить поправки в следующих порядках. Дело в том, что теория оказалась неперенормируемой. Отсепарировать и устранить появляющиеся здесь бесконечности не удастся. Можно, впрочем, быть уверенным, что поправки во втором порядке теории возмущений очень малы.

Гораздо хуже обстоит дело в случае слабых взаимодействий с участием странных частиц, когда при реакциях изменяется их странность. Тогда теоретические предсказания не совпадают с экспериментом даже по порядку величин.

Теория слабых взаимодействий вообще далека от завершения. Сам Ферми предполагал, что взаимодействие четырех фермионов осуществляется в одной точке, локально. Соответственно не существует поля слабых взаимодействий, подобного электромагнитному. Однако именно универсальность четырехфермионного взаимодействия, а также общность характера взаимодействий различной природы делают привлекательной идею существования поля слабых взаимодействий, обмен квантами которого вызывает взаимодействие различных фермионов. Взаимодействие теряет при этом свой локальный характер.

Масса кванта поля слабых взаимодействий, называемого промежуточным бозоном *), должна превосходить массу K -мезонов. Иначе K -мезоны должны были бы распадаться с излучением этого бозона. Из законов сохранения вытекает, что бозон должен нести заряд и иметь спин, равный $\frac{1}{2}$. Большой массе кванта поля, осуществляющего взаимодействие, согласно квантовой теории, соответствует малый радиус взаимодействия. Радиус слабых взаимодействий, если он вообще отличен от нуля, очень мал; он значительно меньше радиуса короткодействующих ядерных сил. Поэтому при тех энергиях, с которыми сейчас имеют дело экспериментаторы, нелокаль-

*) Бозонами называются частицы с целым спином: фотоны, π -и K -мезоны.

ное взаимодействие должно приводить практически к тем же результатам, что и локальное.

Но при больших энергиях взаимодействующих частиц существование промежуточного бозона будет уже определять характер процессов. При энергиях частиц порядка 300 Гэв можно ожидать, что слабые взаимодействия перестанут быть слабыми и сравняются по своей величине с электромагнитными.

Физики ожидают очень многого для всей теории элементарных частиц от более глубокого понимания природы слабых взаимодействий. Вплоть до решения трудностей с бесконечностями. Загадок здесь вообще очень много. Неясно, почему только при слабых взаимодействиях не сохраняются четность и странность. Существование такой частицы, как μ -мезон, совершенно непонятно. Почему π -мезоны предварительно распадаются на μ -мезоны, а не сразу на электрон и нейтрино? В рамках современной теории следует считать, что природа свободно могла бы обойтись без μ -мезонов.

Несколько лет назад, в 1964 г., при исследовании распада K^0 -мезонов было экспериментально обнаружено нарушение незадолго перед этим установленного закона сохранения комбинированной четности. Причина этого остается неясной до сих пор.

Наконец, далеко еще не выяснена роль слабых взаимодействий и нейтрино во Вселенной. Предполагают, что на ранних стадиях эволюции Вселенной и при эволюции звезд слабые взаимодействия играли и играют определенную роль. Не исключено, что рассеянные в межзвездном пространстве нейтрино обладают столь большой энергией и, соответственно, массой, что именно они определяют структуру Вселенной в целом.

В рамках интересующей нас проблемы важно подчеркнуть, что *процессы распада элементарных частиц, за которые ответственны слабые взаимодействия, имеют глубоко статистический характер*. Для каждой частицы существует определенная вероятность распада, не изменяющаяся с течением времени. Для нейтрона, только что образовавшегося в результате какой-либо реакции, и для свободного нейтрона, существующего, к примеру, уже четверть часа, вероятность распасться в ближайшую минуту одинакова.

К такому заключению приводят и теория, и эксперимент. Никакого строго определенного времени жизни у

частицы нет. Имеет смысл только среднее время жизни частицы.

Природа статистического характера процессов распада частиц та же, что и в обычной квантовой механике. Подобно тому, как существует определенная вероятность перехода атома водорода из одного стационарного состояния в другое с излучением фотона, существует определенная вероятность превращения нейтрона в протон с испусканием электрона и антинейтрино.

Это важнейший факт: свободная частица, т. е. частица, не взаимодействующая с другими реальными частицами, не имеет строго определенного времени жизни. Можно отнести статистический характер распада частицы за счет ее взаимодействия с вакуумом. Но такое взаимодействие совершенно неустранимо, и поэтому ни с чем не взаимодействующих, голых частиц нет и не может быть.

Итак, сам факт существования материи в определенной форме на самом глубоком уровне, уровне элементарных частиц, определяется статистическими законами. Большинство частиц может распадаться различными способами, или, как говорят, по различным каналам. Так, например, K^+ -мезон может распадаться на $\mu^+ + \nu_\mu$, $\pi^+ + \pi^0$, $\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$, $\pi^+ + \pi^0 + \pi^0$ и т. д. Каждому каналу соответствует своя вероятность. Можно определить относительную долю (в %) распада по определенному каналу. Распаду K^+ на $\mu^+ + \nu_\mu$ соответствует $63,1 \pm 0,5\%$, а на $\pi^+ + \pi^0 + \pi^0$ — $1,7 \pm 0,1\%$. Заставить частицу распадаться быстрее или медленнее нельзя. Нельзя также направить распад по какому-либо определенному каналу. Статистический характер распада частиц органически присущ их природе.

Отсюда, однако, не следует, что вообще нельзя управлять превращениями частиц. Частицы можно «заставить» взаимодействовать с другими реальными частицами. Тогда откроются новые каналы возможных превращений, конкурирующие с каналами, присущими свободной частице. Но по-прежнему всеми превращениями будут управлять статистические закономерности.

Мы вправе с полным основанием утверждать, что современная квантовая теория отражает статистический характер реальных процессов превращения элементарных частиц, позволяя вычислять вероятности различных превращений, но ни в коей мере не навязывает этот характер природе. Иными словами, нельзя считать, что лишь

неполнота наших знаний не дает возможности однозначно установить направление превращений в мире элементарных частиц.

Отметим еще важную для нашего исследования особенность слабых взаимодействий. Квантовая теория таких взаимодействий, в отличие от электромагнитных взаимодействий, не имеет классического аналога. Точнее, она не имеет классической области применимости. Радиус действия слабых сил, т. е. расстояния, на которых они существенны, не превышает 10^{-14} см. Но на таких малых расстояниях классические законы вообще неприменимы. Это специфически квантовая область.

Электромагнитные силы имеют классический аналог лишь на больших расстояниях, где они также играют важную роль вследствие своего дальнодействующего характера. Кроме того, нейтринное поле, играющее большую роль в теории слабых взаимодействий, имеет неклассический характер по той причине, что спин нейтринно полуцелый. Об этой особенности полей с полуцелым спином упоминалось в предыдущем параграфе.

Но если теория слабых взаимодействий не имеет классического приближения, то, значит, *законами динамического типа слабые взаимодействия, в отличие от электромагнитных, вообще описать нельзя*. Это принципиальный момент. Впервые, как уже отмечалось ранее, мы встречаемся со статистической теорией, не имеющей динамического аналога в качестве первого приближения. Если обычно статистический закон появляется на втором, более глубоком этапе развития наших знаний вслед за динамическим, то при исследовании наиболее интимных процессов мы сразу же должны начинать со статистической теории. Динамических законов здесь просто нет.

§ 16. Сильные взаимодействия

Существование еще одного типа сил, наряду с гравитационными, электромагнитными и слабыми, вытекает из устойчивости атомных ядер. Ни один из перечисленных типов сил не в состоянии объяснить происхождение той огромной энергии связи, которой обладают частицы в ядре.

В 1935 г. японский физик Юкава высказал гипотезу о том, что сильные взаимодействия (ядерные силы) осуществляются посредством особых, неизвестных в то

время частиц, которыми нуклоны обмениваются друг с другом. Из теоретических соображений вытекало, что масса этих частиц, названных мезонами, должна быть промежуточной между массами электрона и нуклона и составлять 200—300 электронных масс.

В 1936 г. подобная частица с массой, в 207 раз превышающей массу электрона, была открыта. Но оказалось, что эта частица (μ -мезон) совершенно не участвует в сильных взаимодействиях. В теории Юкавы возникли большие трудности, пока в 1947 г. не были экспериментально обнаружены частицы, которые обладали всеми необходимыми свойствами для того, чтобы осуществлять сильные взаимодействия. Это были π -мезоны трех сортов: положительные, отрицательные и нейтральные. Их массы составляют примерно 270 электронных масс. Опыт показал, что π -мезоны сильно взаимодействуют с нуклонами атомных ядер.

После открытия π -мезонов началась энергичная разработка теории сильных взаимодействий. Это стало особенно актуальным в связи с теми большими успехами, которые были тогда достигнуты в квантовой электродинамике.

С самого начала было ясно, что теория должна быть квантовой и, следовательно, статистической. Классическая теория мезонных взаимодействий, которая попутно развивалась, могла играть только иллюстративную роль *). Вследствие короткодействующего характера ядерных сил классическое приближение здесь неприменимо, как и в случае слабых взаимодействий. Лишь благодаря тому, что спин π -мезонов равен нулю и сами они подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна, мезонное поле имеет некоторые классические черты.

Общий механизм ядерных взаимодействий вполне аналогичен соответствующему механизму электромагнитных взаимодействий и рассматривается в рамках общей квантовой теории поля. Мезоны являются квантами ядерного поля подобно тому, как фотоны — квантами электромагнитного. Существенное различие между ними состоит в том, что π -мезоны имеют значительную массу покоя, тогда как масса покоя фотонов равна нулю. С этим связан короткодействующий характер ядерных сил. Радиус

*) Подробнее об этом можно прочесть в книге [15].

их действия порядка размеров нуклона — 10^{-13} см (связь между массой частиц-переносчиков взаимодействия и радиусом действия сил можно простым путем получить из принципа неопределенности Гейзенберга).

Обмен мезонами, разумеется, протекает виртуально. Время этого обмена — характерное время ядерного взаимодействия — порядка 10^{-23} сек, что примерно в 100 раз меньше времени электромагнитных взаимодействий. Время обмена квантами, согласно квантовой теории поля, служит показателем интенсивности взаимодействия. Соответственно ядерное взаимодействие в 100 раз сильнее электромагнитного. Постоянная взаимодействия ядерных сил $g^2/\hbar c$ (где g — константа связи нуклонов с π -мезонами, вводимая по аналогии с электрическим зарядом e) равна примерно 14, вместо $e^2/\hbar c \approx 1/137$ для электромагнитных сил.

Еще одним мерилom интенсивности взаимодействия, согласно квантовой теории поля, является число квантов поля вне испускающих их частиц. Ядерные силы настолько велики — это самые мощные из известных сил природы, — что π -мезоны должны испускаться нуклонами очень часто. В каждый данный момент вне нуклона должно быть больше одного π -мезона.

По современным представлениям, нуклон состоит из сердцевинки (так называемый *кern* размером около $0,8 \cdot 10^{-13}$ см), окруженной пульсирующим облаком π -мезонов — мезонной «шубой», аналогичной статическому электрическому полю, окружающему электрические заряды.

Характер мезонного облака можно исследовать экспериментально путем изучения рассеяния быстрых электронов на протонах. Электроны не испытывают ядерных взаимодействий, и их рассеяние определяется только электромагнитными силами. Поэтому картина рассеяния позволяет сделать определенные заключения о распределении заряда внутри нуклона. Носителем же заряда и нужно считать мезонное облако. В этом смысле облако виртуальных мезонов вполне реально. Электрически заряженные слои обнаружены экспериментально и внутри лишенного заряда нейтрона.

Если сообщить нуклону достаточную энергию, то мезоны могут испускаться реально, причем если эта энергия велика, то их число будет очень большим. При подходящих условиях может происходить рождение пар про-

тон — антипротон или нейтрон — антинейтрон. При аннигиляции пар наряду с γ -квантами рождаются π -мезоны.

Различные процессы, обусловливаемые ядерными взаимодействиями, изображены с помощью диаграмм Фейнмана на рис. 9.

На диаграмме рис. 9, а показан процесс испускания протоном π^+ -мезона с превращением в нейтрон n ; на диаграмме рис. 9, б — процесс взаимодействия нуклонов (внутренняя волнистая линия — виртуальный мезон), на диаграмме рис. 9, в — процесс поглощения π^- -мезона протоном с превращением в нейтрон.

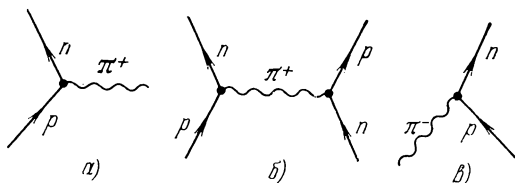


Рис. 9.

Теория сильных взаимодействий строится в принципе так же, как и теория электромагнитных взаимодействий. Сначала квантуются свободные поля, а затем вводится их взаимодействие. Нуклоны описываются уравнением, аналогичным уравнению Дирака для электрона, а π -мезоны — уравнением Клейна — Гордона — Фока, так как у нуклонов полуцелый спин, а у π -мезонов он равен нулю.

Сколько-нибудь подробно на теории сильных взаимодействий останавливаться нет необходимости. Достигнутые здесь успехи весьма скромны. Количественная теория, попросту говоря, не построена. Дело в том, что константа сильных взаимодействий очень велика ($g^2/\hbar c \approx \approx 14$), и поэтому для них неприменим метод теории возмущений, основанный на представлении решения в виде ряда по степеням этой константы. Такое разложение эффективно для электромагнитных взаимодействий с константой, примерно равной $1/137$, но не здесь. Поэтому теория практически не способна дать количественные результаты, хотя и позволяет качественно разобраться в сути многих явлений. Если предсказания теории в электродинамике, например для величины магнитного момента электрона и μ -мезона, возможны с ошибкой, не

превышающей 10^{-8} , то попытки вычислить магнитный момент протона приводят к расхождениям, ббльшим 100%.

Развитие методов, позволяющих получать количественные результаты из уравнений поля, не прибегая к методу теории возмущений, происходит очень медленно. Определенные результаты не получены до сих пор, и поэтому, по существу, остается не вполне ясным, верны ли вообще исходные предпосылки квантовой теории поля применительно к сильным взаимодействиям.

Положение в последнее время еще более усложнилось в связи с открытием очень большого количества сильно взаимодействующих частиц. Среди них есть и частицы с целым спином, способные служить переносчиками ядерных взаимодействий. Наряду со сравнительно долгоживущими K -мезонами, обладающими странностью, и η^0 -мезоном открыты короткоживущие мезоны, или мезонные резонансы, с ядерным временем жизни порядка 10^{-23} сек, X^0 , ρ^0 -, ρ^+ -, ω^0 -, φ^0 -мезоны, также имеющие отличную от нуля странность *). Все эти мезоны вносят свой вклад в ядерные взаимодействия, участвуют в образовании мезонной «шубы» нуклонов. Поэтому, может быть, не так уж удивительно, что попытки построения количественной теории ядерных сил, учитывающей лишь π -мезоны, не имеют успеха. Как же учесть все множество вновь открытых частиц — пока остается неясным.

§ 17. Современное состояние теории элементарных частиц и их взаимодействий

Предпринималось и предпринимается множество попыток преодолеть трудности квантовой теории поля путем выхода за рамки существующей теории.

Прежде всего следует отметить введение нелокальных взаимодействий. В обычной теории взаимодействие полей локально. Взаимодействующие поля (произведение их величин пропорционально энергии взаимодействия) в лагранжиане берутся в одной точке. Это соответствует классической концепции близкодействия: одно поле не может действовать на другое на расстоянии. Введение нелокальных взаимодействий означает отказ от концепции близкодействия. Плотность энергии взаимодей-

*) Подробнее об этих частицах мы будем говорить впоследствии.

ствующих полей зависит от величины полей в двух пространственно-временных точках.

На этом пути удастся устранить бесконечности, но теория оказывается внутренне противоречивой. Нелокальность взаимодействия означает возможность сверхсветовых скоростей и, следовательно, нарушение причинности. Не удастся построить теорию так, чтобы нарушение причинности в микромире (в принципе это еще можно допустить) не приводило бы к нарушению макропричинности, что заведомо недопустимо.

Далее, для устранения бесконечностей пытались вводить так называемую индефинитную метрику (Гейзенберг и др.), что связано с такими трудностями, как появление отрицательных вероятностей. Возможность логически непротиворечивой теории в этом случае не доказана.

Наконец, делались попытки квантования пространства и времени. В этих теориях постулировалось, что на пространственно-временных интервалах, меньших некоего предельного значения, свойства пространства и времени радикально изменяются. Становится существенным наличие элементарной длины.

Все перечисленные выше попытки не привели к сколько-нибудь существенным результатам, и в настоящее время этими вопросами занимается сравнительно небольшое число исследователей.

То же относится и к развиваемой Иваненко, Гейзенбергом с сотрудниками [16] и др. так называемой единой теории поля. В ее основу положено нелинейное уравнение особого типа. Оно записывается для единого спинорного поля (материи), возможными формами существования которого являются различные элементарные частицы. По идее это уравнение должно определять, какие именно элементарные частицы могут существовать в природе, т. е. давать спектр масс элементарных частиц, причем оно должно описывать взаимодействующие частицы. Невзаимодействующих ни с чем частиц в теории быть не должно, как их нет в реальной действительности. Эта обширная и весьма привлекательная со многих точек зрения программа, казалось, уже привела к определенным успехам, но они оказались иллюзорными, и интерес к теории значительно снизился.

Надо подчеркнуть, что все перечисленные выше попытки выхода за рамки существующей теории лежат в русле статистических концепций.

Правда, не так давно Бом, де Бройль, Вигнер и др. сделали отчаянную попытку вернуться к динамическому описанию процессов микромира и выдвинули соответствующую программу. Наряду с возвратом к динамическим закономерностям микромира она включает преодоление существующих трудностей с расходимостями и др. Однако никаких осязательных результатов за время, превышающее десять лет, получено не было. Не объяснен ни один новый эффект, и не предсказано ни одно явление, которое можно было бы наблюдать экспериментально. У большинства ученых это направление не получило поддержки. Да и сами авторы, в частности один из самых активных — Бом, уже не утверждают необходимости построения именно динамической теории процессов микромира.

Сейчас мы не будем детально обсуждать, насколько правомерна сама постановка вопроса о необходимости отыскания динамических законов в микромире. Это очень важно для нашего исследования и будет подробно обсуждаться в дальнейшем. Пока мы ограничимся лишь рассказом о том положении, которое фактически создалось в физике.

Перейдем к наиболее интенсивно развивающимся направлениям, которым посвящено максимальное число публикуемых работ. Речь пойдет преимущественно о работах по теории сильных взаимодействий, так как именно сильные взаимодействия привлекают наибольшее внимание. С одной стороны, состояние теории здесь особенно неблагоприятно, а с другой стороны, именно в этой области имеется огромное количество экспериментального материала, нуждающегося в теоретическом осмысливании, причем количество его растет необычайно быстрыми темпами. Именно в сильных взаимодействиях, как сейчас думают, скрыты наиболее глубокие закономерности мира элементарных частиц. Конечно, не следует забывать про электромагнитные и особенно слабые взаимодействия, но можно надеяться, что и связанные с ними проблемы будут решены, если удастся разобраться в сильных взаимодействиях. Обилие новых фактов, открытие огромного числа короткоживущих сильно взаимодействующих частиц, резонансов, позволяет думать, что успех придет с этой стороны.

Одно из первых мест в исследовании сильных взаимодействий занимает сейчас метод дисперсионных

соотношений. Еще в 1949 г. Гейзенберг предложил новый подход к рассмотрению микропроцессов, основанный на следующих соображениях. На опыте фактически мы можем наблюдать только начальные и конечные состояния частиц или систем частиц, разделенных пространственно таким образом, что их можно считать не взаимодействующими. Соответственно можно допустить, что во времени начальные и конечные состояния тоже разделены сколь угодно большими интервалами. Подобное предположение справедливо для всех экспериментов, которые были проделаны до сих пор. В качестве типичных экспериментов подобного рода назовем опыты с рассеянием частиц. В начальном состоянии, до рассеяния, частицы можно считать свободными; после рассеяния частицы снова рассматриваются как свободные. Эксперимент позволяет установить только вероятности перехода из данного начального состояния в различные конечные, но не дает возможности проследить развитие всего процесса рассеяния во времени. Сама «кухня» процесса сосредоточена в столь малых пространственно-временных интервалах, что, быть может, такое прослеживание в принципе невозможно. Поэтому единственная реальная задача теории, согласно идеям Гейзенберга, состоит в вычислении вероятностей перехода из начального состояния в конечные. Если начальное состояние обозначить $\Psi(-\infty)$, а конечное через $\Psi(+\infty)$ (значки $-\infty$ и $+\infty$ означают, что состояния считаются разделенными бесконечно большим интервалом времени *)), то можно ввести оператор — S -матрицу рассеяния, или S -матрицу, переводящую вектор состояния до рассеяния в вектор состояния после рассеяния, т. е.

$$\Psi(+\infty) = S\Psi(-\infty).$$

Задача теории состоит в нахождении матричных элементов S -матрицы. Таким образом, теория с самого начала ограничивает свои цели. Обычный формализм квантовой теории поля в принципе позволяет полностью исследовать течение процесса во времени, хотя практически в силу перечисленных трудностей в случае сильных взаимодействий этого и не удастся сделать.

*) В случае, например, сильных взаимодействий интервал времени будет физически бесконечно большим уже при $\tau \approx 10^{-21}$ сек, а пространственный интервал — при $r \approx 10^{-11}$ см, когда сильные взаимодействия перестают сказываться.

Но как находить матричные элементы? Их можно определять, используя квантовую теорию поля, если она работает, как в электродинамике. Но если матричные элементы можно искать только в рамках обычной полевой теории, то вся программа Гейзенберга лишается смысла. Поэтому длительное время, когда были еще надежды на то, что теория поля способна дать количественные результаты и для сильных взаимодействий, программа Гейзенберга представляла собой фактически пустую рамку, внутри которой не содержалось ничего. Лишь после того, как стало ясно, что теория поля не приводит к нужным результатам, начались усиленные поиски методов определения S -матрицы, и они привели к значительным успехам.

Оказалось, что, используя весьма общие принципы, можно найти, не прибегая к уравнениям поля, общие свойства, которым должны удовлетворить матричные элементы матрицы рассеяния. Для этой цели служат так называемые дисперсионные соотношения.

Дисперсионные соотношения позволяют разумным образом сопоставить разнообразные сведения, полученные из наблюдения реакций с различными частицами. Они связывают величины, характеризующие рассеяние частиц, с величинами, характеризующими их поглощение. Для получения дисперсионных соотношений на матричные элементы накладывается ряд требований. Прежде всего, они должны быть релятивистски инвариантными. Далее, матрица должна быть унитарна*), т. е.

$$SS^+ = S^+S = 1.$$

Требование унитарности имеет простой физический смысл: вероятность того, что система после взаимодействия будет находиться в каком-либо (любом) состоянии, равна единице. Данные условия, сформулированные еще Гейзенбергом, недостаточны для нахождения матричных элементов. Другое жесткое ограничение, накладываемое на матричные элементы,— требование максимальной аналитичности зависимости матричных элементов от энергии. Аналитичность требуется везде, кроме тех областей, где она противоречит унитарности.

*) S^+ — эрмитово-сопряженная матрица: столбцы заменены строками и матричные элементы являются комплексно-сопряженными элементам матрицы S .

Причем никаких предположений о виде взаимодействия, как в полевых теориях, не делается.

Из этих весьма общих требований можно получить дисперсионные соотношения, которые оказываются весьма полезными при исследовании взаимодействия нуклонов с пионами не слишком больших энергий. Пригодны они отчасти и для описания процессов с частицами, обладающими странностью. Однако в наиболее интересной области больших энергий результаты менее обнадеживающие. В настоящее время остается неясным, можно ли вообще, идя по этому пути, построить замкнутую теорию, позволяющую в рамках S -матричного подхода решить любую задачу.

Надо подчеркнуть еще раз, что при S -матричном подходе к исследованию взаимодействий фактически с самого начала проводится идея отказа от пространственно-временного рассмотрения процессов, так что пространство и время в микропроцессах предстают в виде некой фикции. В действительности же, конечно, далеко не очевидна невозможность вскрытия динамики процессов взаимодействий. Так, есть все основания полагать, что при электромагнитных взаимодействиях такие сверхтонкие эксперименты, как эффект Мессбауэра, нельзя целиком истолковать формализмом S -матричной теории [17].

В связи с этими обстоятельствами, а также с отсутствием математически вполне корректного доказательства справедливости дисперсионных соотношений, в настоящее время развивается так называемый аксиоматический подход к теории элементарных частиц. Цель его состоит в том, чтобы, исходя из наиболее общих принципов (таких, как релятивистская ковариантность, унитарность, локальность, линейность микропроцессов и, наконец, существование вектора состояния — Ψ -функции), получить какие-либо следствия, в частности дисперсионные соотношения, которые можно было бы проверить на опыте. Согласие с экспериментом укажет на правильность этих общих принципов, и на них можно будет опираться при построении будущей теории. Впрочем, путей построения такой теории пока не видно.

Самое существенное, что отличает данный подход от предыдущего, — это требование микропричинности, т. е. требование выполнения принципа причинности (начальное состояние системы однозначно определяет

конечное состояние) на любых сколь угодно малых пространственно-временных интервалах. В обычном S -матричном подходе с его отказом от прослеживания процессов во времени требование микропричинности отсутствует. С помощью аксиоматического подхода уже получен ряд конкретных результатов. Так, Н. Н. Боголюбову удалось совершенно строго доказать справедливость дисперсионных соотношений для пион-нуклонного рассеяния на произвольный угол.

Можно сказать, что аксиоматический подход является наиболее фундаментальным. Но, как таковой, он пока еще не способен обеспечить получение достаточного количества конкретных результатов.

Наконец, множество работ посвящено лишенным особых претензий попыткам рассчитывать в рамках теории возмущений положения и тип сингулярностей амплитуд реакций, которые и определяют, наряду с коэффициентами при сингулярностях, амплитуды рассеяния и связанные состояния.

Нет нужды особо подчеркивать, что как метод дисперсионных соотношений, так и аксиоматический подход развиваются в рамках статистических закономерностей. Элементы S -матрицы имеют смысл вероятностей переходов, а в аксиоматическом подходе с самого начала постулируется существование вектора состояния, квадрат модуля которого в координатном представлении имеет смысл вероятности обнаружения частицы.

Теперь остановимся на еще одном методе, используемом в настоящее время в теории сильных взаимодействий. Его претензии значительно скромнее претензий метода дисперсионных соотношений и аксиоматического подхода, но он позволил достичь больших практических успехов. Имеется в виду применение принципов симметрии и, соответственно, законов сохранения при изучении сильных взаимодействий.

§ 18. Принципы симметрии и систематика элементарных частиц

Принципы симметрии, или инвариантности, играют важную роль во всей физике. Значение их по мере развития физики увеличивается, и в настоящее время они, особенно в теории сильных взаимодействий, занимают исключительное положение.

Законы природы, о которых у нас шла речь, вскрывают регулярности, существующие в явлениях природы. Наряду с начальными условиями они в принципе определяют поведение объекта с той степенью точности, с какой это вообще возможно.

Принципы инвариантности, или симметрии, носят более общий характер, чем законы природы. Они пронизывают все физические теории. Законы физики служат сырьем для установления этих принципов, подобно тому как события — сырьем для установления законов [18].

Принципы симметрии, или инвариантности, позволяют обнаруживать новые корреляции между событиями на основе уже найденных корреляций. Фактически к этому сводится содержание специальной теории относительности, как уже говорилось ранее. Корреляции между событиями одинаковы во всех координатных системах, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга.

Значение принципов инвариантности в их общности, благодаря которой они служат пробным камнем для законов природы. Непреложным условием справедливости законов природы является их соответствие этим принципам.

Очень важна связь принципов инвариантности с законами сохранения, устанавливаемая теоремой Нетер. Фактически во многих случаях законы сохранения просто вытекают из принципов инвариантности. Для получения законов сохранения не нужно точно знать сами законы движения. Достаточно иметь сведения об основных свойствах математического аппарата теории: лагранжева формализма в классической механике или формализма гильбертова пространства в квантовой механике.

Существующие принципы инвариантности и описывающие их группы симметрии делятся на пространственно-временные (называемые также геометрическими или внешними) и внутренние симметрии, описывающие специфические свойства элементарных частиц.

К пространственно-временным симметриям относятся в первую очередь симметрии, описываемые неоднородной группой Лоренца.

а) Евклидовы преобразования: сдвиг и поворот системы отсчета пространственных координат. С этими пре-

образованиями связаны законы сохранения импульса и момента импульса.

б) Сдвиг времени, т. е. изменение начала отсчета времени. Из инвариантности относительно этого преобразования вытекает закон сохранения энергии.

в) Преобразования Лоренца при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Отсюда вытекает закон движения центра масс изолированной системы.

К данным симметриям добавляются еще три.

г) Обращение времени (операция T). Фундаментальные законы природы не изменяются при замене t на $-t$. Все фундаментальные процессы природы обратимы во времени. Необратимость, наблюдаемая в макром мире, имеет статистическое происхождение и связана с неравновесным состоянием Вселенной.

д) Зеркальная симметрия природы (отражение пространства, или операция P). Законы природы не изменяются при преобразовании $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$. В квантовой механике этой симметрии соответствует сохранение особого квантового числа — четности, которое можно приписать каждой частице.

е) Зарядовое сопряжение (операция C). Замена всех частиц на античастицы не изменяет характера процессов в природе.

С последними тремя симметриями дело обстоит сложнее, чем с предыдущими: зеркальная симметрия и зарядовое сопряжение сохраняются только при электромагнитных и сильных взаимодействиях. При слабых взаимодействиях зеркальная симметрия и зарядовое сопряжение нарушаются. Законы природы инвариантны только при одновременном преобразовании $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$ и зарядовом сопряжении (CP -инвариантность).

Из самых общих постулатов квантовой механики, дополненных предположением о локальности взаимодействий и релятивистской инвариантности теории, вытекает инвариантность относительно CPT -преобразования (теорема Паули — Людерса). Но общие принципы не требуют инвариантности относительно C - и P -преобразований порознь и одновременного CP -преобразования. Нарушение CP -инвариантности означало бы отсутствие симметрии правого и левого в вакууме, и поэтому до последнего времени никто не сомневался, что эта инвариантность существует. Однако в 1964 г. данные о

распаде долгоживущих K^0 -мезонов на два π -мезона, а не на три частицы, как обычно наблюдается, осложнили ситуацию. Первый процесс может идти, согласно существующим представлениям, только с нарушением CP -инвариантности. Если это действительно так, то вместе с тем ставится под сомнение обратимость процессов во времени или отсутствие CPT -инвариантности, что означает крушение основных принципов, на которых основаны все современные представления. Пока, однако, данный вопрос остается неясным, и мы не будем его обсуждать подробнее. Возможно, что нарушение CP -инвариантности обусловлено особым сверхслабым взаимодействием.

Обратим внимание на проявляющуюся с полной очевидностью иерархию принципов симметрии. Одни из них выполняются при любых взаимодействиях, другие же (C и P) — только при сильных и электромагнитных. Эта иерархия имеет большое значение и проявляется еще отчетливее во внутренних симметриях и соответствующих им законах сохранения, к которым мы сейчас перейдем. Среди них нас прежде всего интересуют законы сохранения электрического, барионного и лептонного зарядов, выполняющиеся при любых взаимодействиях.

При всех превращениях элементарных частиц алгебраическая сумма электрических зарядов частиц остается неизменной. В этом состоит закон сохранения электрического заряда. В квантовой механике сохранению заряда соответствует градиентное преобразование волновой функции, изменяющее ее фазу на постоянную величину Δ , т. е.

$$\Psi \rightarrow \Psi e^{i\Delta}.$$

Квадрат модуля Ψ не изменяется, и, соответственно, новая волновая функция описывает те же состояния, что и старая.

Далее, опыт показывает, что ядерное вещество сохраняется: разность между числом тяжелых частиц и числом их античастиц не изменяется при любых процессах. Барионы могут рождаться только парами частица — античастица. Распадаться на более легкие частицы барионы не могут. Это можно истолковать следующим образом: каждому бариону нужно приписать особое квантовое число — барионный заряд, равный $+1$, а каждому антибариону — заряд -1 . Тогда определенный таким

образом барионный заряд сохраняется, причем его сохранению также соответствует градиентное преобразование волновой функции.

Аналогичным образом обстоит дело и с лептонами. Разность числа лептонов (электронов, нейтрино и μ -мезонов) и антилептонов не изменяется ни при каких реакциях. Поэтому каждому лептону можно приписать сохраняющееся квантовое число — лептонный заряд, равный $+1$, а каждому антилептону — заряд -1 . (Однако после открытия двух сортов нейтрино стало очевидным, что необходимо ввести два сохраняющихся независимо друг от друга лептонных заряда — электронный лептонный заряд у электронов и электронного нейтрино и мюонный лептонный заряд у μ -мезонов и мюонных нейтрино.

Теперь перейдем к внутренним симметриям аналогичного характера, но выполняющимся только при взаимодействиях определенного типа.

Одна из давно известных симметрий — изотопическая инвариантность. Опытным путем была установлена с большой точностью зарядовая независимость сильных взаимодействий. Ядерные взаимодействия протона с протоном и нейтрона с нейтроном совершенно одинаковы. Поэтому еще в 30-годах Гейзенберг предложил рассматривать протон и нейтрон как два различных квантовых состояния одной частицы — нуклона. Различаются протон и нейтрон только электрическим зарядом. Небольшое различие их масс обусловлено электромагнитными взаимодействиями. При сильных взаимодействиях они выступают как одна частица. Для описания данной ситуации вводится понятие изотопического спина. Можно характеризовать нуклоны одной величиной — изотопическим спином I , проекция которого на некое выбранное направление z в изотопическом пространстве принимает два возможных значения. Протону приписывается значение проекции спина $I_z = +\frac{1}{2}$, нейтрону — значение $-\frac{1}{2}$. Слово «изотопический» отражает примерное равенство масс нуклонов, а сама величина называется спином потому, что формальные аппараты описания зарядовой независимости и обычного механического спина тождественны. И там и здесь мы имеем дело с величиной, принимающей два дискретных значения (проекция механического спина для частицы с полуцелым спином принимает значения $\pm \frac{1}{2}\hbar$).

Изотопическая инвариантность заключается в том, что волновые функции нуклонов можно подвергнуть произвольному унитарному преобразованию *) с матрицей второго порядка, действующей на индекс проекции изотопического спина, и детерминантом, равным единице (так называемая SU_2 -симметрия). Величина изотопического спина сохраняется, но только в процессах, вызванных сильными взаимодействиями. При электромагнитных и слабых взаимодействиях изотопический спин изменяется.

Изотопическая инвариантность позволила объединить сильно взаимодействующие частицы в группы, называемые зарядовыми мультиплетами. Частицы, входящие в мультиплет, имеют близкие массы и различаются электрическим зарядом. Нуклоны образуют зарядовый дублет. Замечательным образом для всех сильно взаимодействующих частиц характерна зарядовая независимость. Они группируются в зарядовые мультиплеты с определенным значением изотопического спина. Так, три π -мезона образуют зарядовый триплет с изотопическим спином, равным единице. Этому спину соответствуют три значения проекции, равные $+1$, 0 , -1 и отвечающие π^+ , π^0 и π^- -мезонам. С помощью изотопической инвариантности устанавливается ряд соотношений между сечениями процессов с участием частиц, входящих в один зарядовый мультиплет.

Еще одна симметрия, связанная с сохранением странности, выполняется, как уже упоминалось, только при сильных и электромагнитных взаимодействиях, но нарушается слабыми взаимодействиями. Экспериментально это было обнаружено следующим образом. С 1947 г. начали появляться сообщения о существовании целого ряда тяжелых частиц, рождающихся в большом количестве при энергиях первичного пучка, превышающих некоторый предел. Большое число образующихся частиц указывало на то, что рождение их вызывается сильными взаимодействиями, так как сечение реакций рождения достаточно велико лишь для этих взаимодействий. Но если рожденные частицы относятся к сильно взаимодействующим, то их распад тоже должен происходить в результате ядерных взаимодействий с характерным

*) То есть преобразованию, сохраняющему квадрат модуля (норму) волновой функции.

временем жизни порядка $10^{-22} — 10^{-23}$ сек. Никакие известные законы сохранения не запрещали распада таких частиц. Распад и происходил в действительности, но только по каким-то причинам существенно тормозился. Частицы жили в сотни тысяч миллиардов раз дольше, чем полагается сильно взаимодействующим частицам. Чтобы объяснить эти факты, предположили существование особого закона сохранения — закона сохранения странности. K -мезоны и гипероны (Λ^0 -, Σ^+ -, Σ^0 -, Σ^- -, Ξ^- -, Ξ^0 -частицы) обладают особым квантовым числом — странностью, которое сохраняется при сильных и электромагнитных взаимодействиях *) (странность нуклонов и π -мезонов равна нулю). Поэтому за счет сильных взаимодействий одновременно рождаются пары частиц с противоположными знаками странности. Распад же частиц происходит под влиянием слабых взаимодействий с присущим ему характерным временем, причем странность частиц меняется на единицу.

Гелл-Манну и Нишиджиме удалось осуществить классификацию странных частиц путем правильной группировки их в изотопические мультиплеты и введения странности. K^- - и \bar{K}^0 -частицы образуют дублет со странностью $S = -1$. Такую же странность имеют синглет Λ^0 и триплет Σ^- , Σ^0 , Σ^+ . Странность дублета Ξ^- , Ξ^0 равна -2 . Соответствующие античастицы имеют странность противоположного знака. Очень важно, что найденное Гелл-Манном и Нишиджимой эмпирическое в своей основе правило разбиения странных частиц на зарядовые мультиплеты позволило предсказать существование новых частиц и их основные свойства. Большая часть перечисленных выше частиц была предсказана до их экспериментального обнаружения.

Однако подлинная систематика элементарных частиц, базирующаяся на введении нового квантового числа, странности, была построена позднее, когда было открыто огромное количество сортов частиц с аномально малым временем жизни $10^{-22} — 10^{-23}$ сек, получивших название резонансов. Время жизни резонансов столь мало (по порядку величины оно равно времени прохождения частицы с околосветовой скоростью через нуклон), что обнаружить их в камере Вильсона невозможно. Их находят

*) Впрочем, сохранение странности эквивалентно сохранению проекции изотопического спина.

по резонансному пику на кривой, дающей зависимость числа рассеянных частиц от энергии. Ширина резонансного пика позволяет оценить время жизни частицы с помощью принципа неопределенностей Гейзенберга.

Резонансы возникают при рассеянии сильно взаимодействующих частиц друг на друге и сами принадлежат к сильно взаимодействующим частицам. Первый резонанс был открыт Ферми при рассеянии мезонов на нуклонах. В дальнейшем число вновь открытых резонансов, мезонных и барионных, начало очень быстро нарастать. В настоящее время их число превышает 200.

После открытия резонансов вся проблема элементарных частиц получила новое освещение. Хотя у резонансов время жизни на 6—8 порядков меньше, чем у относительно стабильных частиц, в принципе они ничем не отличаются от последних. Резонансы обладают массой, спином, электрическим и барионным зарядом, странностью и четностью, которые можно определить экспериментально. Все они группируются в зарядовые мультиплеты с определенным изотопическим спином. Но число их столь велико, что понятие элементарной частицы потеряло прежний смысл. В теории элементарных частиц возникла сложная, запутанная ситуация. Никакого четкого критерия элементарности частицы в настоящее время нет. Не может служить, в частности, таким критерием время жизни частицы. Так, дейтрон имеет бесконечное время жизни, но никто не рассматривает его как элементарную частицу, а π^0 -мезон живет 10^{-16} сек, но считается элементарным образованием.

Но дело не только в этом. Частицы, называемые по традиции элементарными, обладают в действительности сложной структурой. Так, протоны и нейтроны окружены облаками пионов и других мезонов. Пионы структурно входят в нуклон. В свою очередь π -мезоны могут виртуально превращаться в пару нуклон — антинуклон и т. д. Поэтому исследование свойств частиц какого-либо одного сорта невозможно без изучения свойств других. Частицы каждого сорта, по выражению М. А. Маркова, начинают представляться композицией частиц всех остальных сортов. Получается замкнутый круг: свойства одной из частиц определяются всеми остальными. Размыкается ли где-либо этот круг, т. е. имеются ли частицы-аристократы, из которых построены все остальные,

или же в природе вообще не существует частиц подобного рода, пока не известно.

Таким образом, проблема создания динамики элементарных частиц представляется крайне сложной и на первый план выдвигается задача систематизации элементарных частиц, подобной той, которая была создана в свое время Д. И. Менделеевым для атомов химических элементов. Именно применение принципов симметрии, иерархия этих принципов, позволили достичь очень больших успехов. В определенном смысле можно сказать, что систематика сильно взаимодействующих частиц уже создана (фотон и лептоны в эту систематику не входят).

Новая систематика основана на расширении SU_2 -группы симметрии изотопического спина. Знакомство с таблицей элементарных частиц показывает, что у частиц с одинаковыми барионным зарядом B , механическим спином и четностью разности масс малы по сравнению с массами самих частиц. Массы адронов (так часто называют сильно взаимодействующие частицы) мало чувствительны к величине изотопического спина и странности (вместо странности часто вводят так называемый гиперзаряд, равный сумме барионного заряда и странности: $Y = B + S$). Именно это обстоятельство навело на мысль, что существует более широкая, чем SU_2 , группа внутренней симметрии. Изотопические мультиплеты частиц с одинаковыми B , спином и четностью можно объединить в супермультиплеты, в которых частицы различаются изотопическим спином, его проекцией и гиперзарядом (или странностью).

Физическая идея, лежащая в основе построения новой, более широкой группы симметрии, состоит в предположении о том, что адроны участвуют в сильных взаимодействиях двух типов: очень сильном взаимодействии и умеренно сильном взаимодействии. Первое не влияет на изотопический спин и странность. Именно оно определяет в основном массы частиц. Умеренно сильное взаимодействие приводит к зависимости масс от изотопического спина и странности точно так же, как электромагнитное взаимодействие — к зависимости масс частиц от электрического заряда внутри зарядового мультиплета.

Математическим выражением этой идеи является утверждение об инвариантности сильных взаимодействий по отношению к произвольным унитарным преобразованиям с матрицей третьего порядка и детерминантом,

равным 1 (группа преобразования SU_3). Из SU_3 -симметрии непосредственно вытекает возможность объединения частиц в супермультиплеты, причем число частиц в каждом из них определяется размерностью неприводимых представлений группы. Эти числа оказываются равными 1, 3, 6, 8, 10, 15 и т. д. Известные сейчас частицы целиком заполняют супермультиплеты 1, 8, 10. Это в первую очередь мезонный (рис. 10) и барионный (рис. 11) октеты,

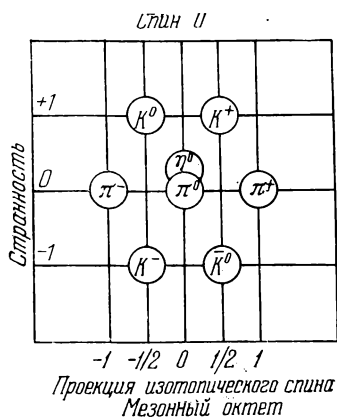


Рис. 10.

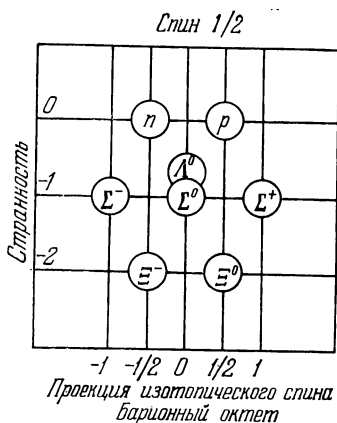


Рис. 11.

мезонный резонансный октет и барионный резонансный декуплет (рис. 12).

Существование Ω^- -частицы из резонансного барионного декуплета и все ее важнейшие свойства, включая массу, были предсказаны на основании SU_3 -симметрии. Экспериментальное обнаружение Ω^- -частицы в 1964 г. служит одним из самых сильных доказательств справедливости классификации частиц, основанной на SU_3 -симметрии *).

Другое важнейшее следствие SU_3 -симметрии — так называемые массовые формулы. Если бы SU_3 -симметрия была строгой, то массы всех частиц супермультиплета были бы точно одинаковы. Но умеренно сильное взаимодействие нарушает симметрию. Считая это нарушение

*) Ω^- -частица распадается в результате слабых взаимодействий. Законы сохранения запрещают ей распад за счет сильных взаимодействий. Поэтому Ω^- -частица живет долго, и в этом смысле ее нельзя считать резонансом.

малым, можно с помощью теории возмущений по известным трансформационным свойствам члена в гамильтониане, ответственного за нарушение симметрии, найти зависимость масс частиц в супермультиплетах от изотопического спина и гиперзаряда. Уже в первом порядке массовая формула Окубо — Гелл-Манна для мезонного октета согласуется с экспериментом с погрешностью 5,5%, а для барионного — с погрешностью 0,5% *).

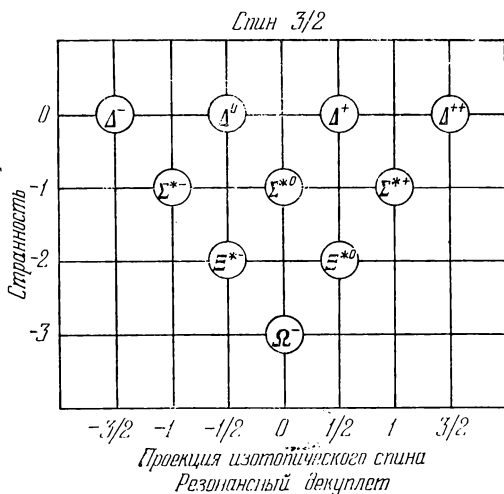


Рис. 12.

Точность здесь неожиданно высока, хотя разности масс частиц супермультиплета не малы и достигают сотен Мэв. Это заставляет полагать, что очень сильное взаимодействие значительно превосходит умеренное.

Несмотря на поразительные успехи новой систематизации, теория встречается с рядом трудностей. В частности, остаются незаполненными супермультиплеты с тремя и шестью частицами. Но тут же следует оговориться, что именно с триплетом связана новая интересная идея, позволяющая, с одной стороны, очень просто и наглядно представить себе суть систематики адронов, а с другой стороны, — приблизиться к решению вопроса о том, что же именно — демократия или аристократия —

*) Именно массовая формула позволила с большой точностью предсказать массу Ω^- -частицы.

господствует в мире элементарных частиц. Иными словами, все ли частицы элементарны в равной мере или же существуют фундаментальные частицы, из которых составлены все остальные. Гелл-Манн и Цвейг высказали гипотезу, что все сильно взаимодействующие частицы построены из некоторых фундаментальных частиц, образующих триплет. Эти гипотетические частицы были названы кварками.

Действительно, все мезоны, барионы и резонансы можно представить состоящими из кварков, но для этого последним нужно приписать дробные электрические и барионные заряды — шаг, на который решиться нелегко. Квантовые числа кварков (их обозначают символами p , n и λ) представлены в таблице. У антикварков знаки зарядов и странности противоположны. Каждый мезон или мезонный резонанс состоит из кварка и антикварка, а барион и барионный резонанс — из трех кварков или трех антикварков (подробнее см. [19]). Разница в массах частиц супермультиплета объясняется тем, что λ -кварк тяжелее p - и n -кварков на 146 Мэв . Равноценность всех трех кварков при сильных взаимодействиях и означает существование унитарной SU_3 -симметрии.

Квар- ки	Электри- ческий заряд	Стран- ность	Барион- ный за- ряд	Спин
p	$\frac{2}{3}$	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
n	$-\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
λ	$-\frac{1}{3}$	-1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$

До сих пор, несмотря на настойчивые поиски, кварки не обнаружены в природе и их не удалось получить с помощью существующих ускорителей. Последнее обстоятельство говорит о том, что масса кварков должна быть очень большой; она должна в 6—7 раз превышать массу нуклонов, и энергии современных ускорителей просто не хватает.

Таким образом, массы частиц, состоящих из кварков, в несколько раз меньше массы самих кварков. Дефект масс при образовании частиц из кварков поистине грандиозен. Впрочем, во всем, что касается кварковой модели частиц, остается много неясного. Не ясно, какие силы могут удерживать кварки друг возле друга и как

эти силы связаны с известными ядерными взаимодействиями. Фактически создана только статическая модель частиц из кварков, а динамическая ее основа отсутствует *). Ясно лишь одно — независимо от того, существуют ли кварки, SU_3 -симметрия содержит много рационального и в той или иной форме выдержит дальнейшее испытание временем.

Заметим, наконец, что сейчас делаются попытки расширения группы SU_3 -симметрии путем объединения внутренних и пространственно-временных симметрий. В частности, группу SU_3 объединяют с группой пространственных вращений. Получающаяся группа носит название группы SU_6 -симметрии. Здесь уже в одном супермультиплете объединены частицы, отличающиеся не только зарядом, изотопическим спином и странностью, но и механическим спином. Все барионы и барионные резонансы объединены в группу из 56 частиц, а мезоны и мезонные резонансы — в группу из 35 частиц (в рамках кварковой модели частиц SU_6 -симметрия просто означает, что взаимодействие кварков не зависит от взаимной ориентации их механических спинов).

Представление о такой расширенной группе симметрии уже оказалось плодотворным. Так, установлены связи между массами частиц с разными спинами. Получена простая связь магнитных моментов нейтрона и протона. Согласно теории отношение моментов равно $-\frac{2}{3}$, что с ошибкой до 2% совпадает с экспериментально найденной величиной. Но вместе с тем имеются и большие трудности. В частности, остаются незаполненными супермультиплеты из 6 и 15 частиц, которые должны существовать согласно теории, и т. д.

Как бы то ни было, несомненно, что успехи в классификации элементарных частиц на основе принципов симметрии и иерархии последних очень велики, хотя мы не можем сказать, почему эти симметрии существуют. Почему существуют приближенные симметрии с соответствующей иерархией? Объяснение этого — дело будущего.

В заключение нужно подчеркнуть, что *принципы симметрии* носят однозначный (в этом смысле — динамический) характер, не допускающий какого-либо статистического разброса. Таким образом, *они должны рассмат-*

*) Здесь термин «динамический» означает просто — движущийся.

*риваться как динамические элементы в общем-то статистической картины мира *)*. Уже в силу своего однозначного характера принципы симметрии, как бы успешно ни продвигалось их обобщение в дальнейшем, никогда не смогут заменить теорию, детально объясняющую процессы в микромире. Это несовместимо со статистическим характером поведения микрообъектов.

Однозначность принципов симметрии ни в малой степени не противоречит статистическому характеру самих теорий поведения микрообъектов. Достаточно отметить, что именно в квантовой механике, статистической в своей основе, принципы симметрии играют несравненно более важную роль, дают возможность получить больше следствий, чем в классической механике, теории сугубо динамической.

В качестве примера укажем, что в квантовой механике из симметрии относительно пространственных отражений вытекает закон сохранения четности, тогда как в классической механике отсюда нельзя вывести никаких существенных следствий.

Большая роль принципов симметрии в квантовой механике, согласно Вигнеру [18], связана с тем, что в ней выполняется нетривиальный принцип суперпозиции состояний, позволяющий из двух векторов состояния построить бесчисленное множество новых векторов.

* * *

На этом мы закончим обзор фундаментальных физических теорий и перейдем к нашей главной задаче— исследованию в деталях соотношения между динамическими и статистическими закономерностями.

*) Подробнее на этом вопросе мы остановимся в дальнейшем.

ГЛАВА III

ДВА АСПЕКТА ПРОБЛЕМЫ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ДИНАМИЧЕСКИМИ И СТАТИСТИЧЕСКИМИ ЗАКОНОМЕРНОСТЯМИ

§ 1. Общая схема взаимосвязей фундаментальных физических теорий

В предыдущей главе мы кратко рассмотрели в историческом аспекте фундаментальные физические теории, составляющие основу физики. Теперь мы представим на единой схеме важнейшие физические теории и проследим соотношения между ними. Это позволит в наиболее наглядной форме познакомиться с главными фактами, касающимися соотношения между динамическими и статистическими закономерностями.

Приступая к построению общей схемы, мы тем самым должны заняться классификацией физических теорий. Конечно, любая попытка классификации с неизбежностью содержит элементы условности и сама по себе такая схема вряд ли может представлять заметную ценность. Отдавая себе в этом полный отчет, мы тем не менее решаемся предложить вниманию читателя подобную схему (см. ниже). Оправдание этого уже приведено в предыдущем абзаце. Его можно расширить.

Схема взаимосвязей физических теорий, как нам представляется, позволяет наиболее естественным образом прийти к формулировке основного тезиса, защищаемого в настоящей работе. Дело в том, что эта схема, несмотря на спорность отдельных, быть может и существенных, положений, в определенных отношениях важных как раз для нашего исследования, отражает непосредственные факты, касающиеся современного состояния

науки. В дальнейшем именно на такого рода фактах мы и сосредоточим внимание.

Теперь сделаем последнее предварительное замечание. Основной тезис нашего исследования о соотношении динамических и статистических закономерностей с неизбежностью следует из существующих фактов, из реального содержания физических теорий. Рассмотрение общей схемы взаимосвязей физических теорий не является центральным, необходимым звеном в цепи наших доказательств. Вводится она исключительно для большей наглядности. Прибегать к максимально широкой и всесторонней аргументации нас побуждает лишь то, что слишком большое число авторов, занимающихся исследованием данного вопроса, не замечает, казалось бы, вполне очевидных фактов.

Перейдем теперь к существу дела. Как наиболее целесообразно расположить в одной схеме разнообразные теории, с которыми имеет дело современная физика? Очевидно, не следует останавливаться на единственном классификационном принципе. «Одномерная» схема не может вместить в себя все богатство и разнообразие физических теорий и их взаимосвязей.

Наиболее естественно производить классификацию теорий по двум признакам: *формам движения материи и уровням глубины познания окружающего мира* (см. схему). Оба эти принципа классификации, разумеется, не новы. Классификация процессов по формам движения материи производилась еще Ф. Энгельсом. Концепцию уровней широко пропагандирует Бом. Новым является лишь классификация по тем и другим признакам одновременно, что оказывается весьма удобным. Иначе в каждой классификационной клетке содержалось бы несколько весьма различных теорий и «внутриклеточное» деление требовало бы к себе особого внимания. Даже в нашей «двумерной» схеме в ряде случаев нужны «внутриклеточные» подразделения и пространные пояснения. Мы ограничиваемся двумерной классификацией потому, что она достаточна для наших целей. Переход к более детальным трех- или четырехмерным классификациям лишь осложнил бы без нужды необходимое для данного исследования выяснение сути дела.

Прежде всего, теории можно разделить в самом общем смысле на теории макроскопических систем и теории микроскопических объектов. Теории первой группы

рассматривают явления в системах из очень большого числа частиц, к которым применимо понятие температуры. Такое разделение вполне естественно, и против него трудно что-либо возразить. Как правило, макроскопические системы и отдельные элементарные процессы с участием небольшого числа микрообъектов описываются совершенно различными теориями.

Далее, теории процессов в макросистемах вполне отчетливо разделяются по уровням на макроскопические (или феноменологические) и микроскопические. На макроскопическом уровне все тела и поля считаются непрерывными. На этом уровне не учитывается ни атомная структура вещества, ни дискретные свойства полей. В основе теорий микроскопического уровня, напротив, лежат представления о дискретном строении материи.

При исследовании микроскопических объектов целесообразно выделить классический и квантовый уровни. Скачок при переходе от классических представлений к квантовым очень велик. Отдельно следует также выделить релятивистскую квантовую теорию — самую глубокую современную теорию микропроцессов — теорию элементарных частиц и их превращений. Она качественно отличается от нерелятивистской квантовой механики.

Другое «измерение» нашей схемы — классификация по формам движения материи, или, можно сказать, по типам взаимодействия движущейся материи. На первое место следует поставить обычное *механическое движение*, а также *тепловое движение*, как некоторую надстройку над механическим движением, лежащим в его основе. Далее бесспорное место принадлежит электромагнитному полю, как особой форме движения материи, осуществляющей взаимодействие электрически заряженных частиц. Надо отметить, что механическая и электромагнитная формы движения материи для макросистем на микроскопическом уровне и для индивидуальных микроскопических объектов далеко не тождественны. В первом случае механическая и электромагнитная формы движения комбинируются с тепловой формой, а во втором — нет.

На макроскопическом уровне имеются еще гравитационные взаимодействия. Но на микроскопическом уровне мы встречаемся дополнительно с теориями сильных и слабых взаимодействий. В квантовой теории поля они занимают такое же положение, как и электродинамика.

Здесь может возникнуть следующий вопрос: не должна ли классификация теорий по формам движения материи быть просто классификацией по типу элементарных частиц? Ведь то, что сейчас называют элементарными частицами, можно считать различными формами существования или движения материи. Однако от подобной попытки нужно сразу же отказаться. Во-первых, по той простой причине, что даже стабильных и относительно стабильных частиц очень много. Во-вторых, и это главное, имеется очень важный, объединяющий группы частиц признак — *способность к взаимодействиям того или иного типа*. По типам взаимодействия и следует производить классификацию.

Перейдем теперь к самой схеме, к объяснению ее деталей, не упомянутых во вводных замечаниях. Будем двигаться сверху вниз от одной горизонтальной полосы к другой.

I. Макроскопический уровень, на котором не учитывается атомная структура. В первых двух клетках находятся механика и термодинамика равновесных процессов. Эти теории описывают два тесно связанных типа движения: механическое и тепловое. Их целесообразно поместить рядом не только из-за тесных связей между ними (например, механика сплошных сред немыслима без термодинамики, а термодинамика — без таких механических понятий, как давление, сила, работа и т. д.), но и потому, что на следующем уровне механическая и тепловая формы движения материи уже не разделяются достаточно резко.

В механике естественно выделить механику твердого тела и феноменологическую теорию необратимых процессов (макроскопический аспект физической кинетики), включающую в себя в первую очередь механику сплошных сред. Последняя рассматривает как идеальные среды, так и реальные, в которых происходит диссипация механической энергии.

Следующую клетку занимает макроскопическая электродинамика Максвелла, включающая в себя классическую оптику.

Сильные и слабые взаимодействия из-за своего короткодействующего характера не проявляются и не могут проявиться на данном уровне. Конечно, вещество в том виде, в каком оно существует, немыслимо без этих

Теории макроскопических систем		Механические и тепловые явления (тепловые явления только для макросистем)		Электромагнитные взаимодействия	Сильные взаимодействия	Слабые взаимодействия	Гравитационные взаимодействия
I	Макроскопический уровень	Механика твёрдого тела	Термо-динамическая	Макроскопическая электродинамика			Теория тяготения Эйнштейна
	Микроскопический уровень	Статистическая механика (классическая и квантовая)	Статистическая механика (классическая и квантовая)	Статистическая физика	Теория эволюции звезд и Вселенной		
III	Классический уровень	Классическая механика материальной точки	Классическая статистика	Уравнения Максвелла-Лоренца для микропроцессов			
	Квантовый уровень	Нерелятивистская квантовая механика	Квантовая статистика	Квантовая теория			
Теории микроскопических объектов		Релятивистская квантовая механика		Релятивистская квантовая электродинамика	Теория сильных взаимодействий	Теория слабых взаимодействий	Квантовая теория гравитации

взаимодействий. Но при феноменологическом рассмотрении процессов в макроскопических телах свойства последних считаются известными из эксперимента и никакие попытки объяснить происхождение этих свойств не делаются. Поэтому на уровне, на котором игнорируется микроскопическая картина строения вещества, сильные и слабые взаимодействия не рассматриваются. Следовательно, две следующие клетки при принятой системе классификации должны всегда оставаться пустыми.

Наконец, в последней клетке находится теория тяготения. В классической физике — это закон всемирного тяготения Ньютона, а в современной — теория тяготения Эйнштейна, созданная на основе его общей теории относительности.

Все теории данного макроскопического уровня являются динамическими. Все они возникли раньше теорий, описывающих те же формы движения материи на более глубоких уровнях. Исключение составляет теория гравитации в том смысле, что ей на более глубоких уровнях пока что не соответствует почти ничего.

II. Макроскопические системы на микроскопическом уровне (вторая полоса). Здесь возникают определенные затруднения в классификации. Здесь нет столь ясно и однозначно очерченных теорий, как на предыдущем уровне. *Все теории макроскопических систем на микроскопическом уровне можно назвать статистической физикой материи — вещества и полей.* В основе ее лежат уравнения индивидуальных микроскопических процессов с частицами и полями. Статистический метод позволяет на основе уравнений для элементарных процессов построить теорию поведения систем с очень большим числом степеней свободы.

Такое разбиение представляется нам достаточно очевидным и логичным. Но дальнейшая классификация по формам движения или типам взаимодействий не однозначна. Во всяком случае, нет общепринятого деления статистической физики на определенные разделы.

Наиболее естественна, по-видимому, такая классификация. Сначала нужно выделить статистическую механику, в которой с микроскопических позиций изучаются механическое и тепловое движения. Основная причина ее выделения в особый раздел состоит в том, что в ней не рассматриваются поля. Движение частиц, составляющих системы, происходит под действием заданных сил,

которые понимаются в духе механики Ньютона (дальнодействие). Соответственно теория может быть справедливой в том случае, когда запаздыванием взаимодействий, конечной скоростью их распространения можно пренебречь. Исторически прежде всего возникла статистическая механика. Статистическая теория электромагнитного поля была построена позднее.

Статистическую механику уместно подразделить на статистическую теорию необратимых процессов в различных средах (газах, жидкостях и деформируемых твердых телах) и на статистическую термодинамику — теорию равновесных тепловых процессов на микроскопическом уровне. Первая теория представляет собой статистический аспект физической кинетики и весьма интенсивно развивается в последние годы.

Можно было бы выделить в статистической механике еще классический и квантовый подуровни, но мы их рассматривать не будем. Как отмечалось выше, принципиального различия в методах классической и квантовой статистики нет. Наиболее последовательным представляется начинать построение статистической механики с квантовой статистики. Именно так, например, строится курс Ландау и Лифшица. Классическую статистику надо рассматривать как предельный случай квантовой. Тогда удастся обойти ряд существенных трудностей классической статистики, связанных с непрерывностью классических состояний и, естественно, бесконечным числом микросостояний, реализующих любое макросостояние системы.

Вторую клетку второй полосы занимает микроскопическая электродинамика. Здесь, в отличие от статистической механики, наряду с частицами рассматривается и электромагнитное поле. Функция Гамильтона содержит как члены, относящиеся к частицам, так и полевые члены. Включение в аппарат статистической теории электромагнитного поля является существенно новым шагом.

Можно разделить микроскопическую электродинамику на статистическую теорию собственно электромагнитного поля и статистическую теорию поведения систем заряженных частиц, взаимодействующих посредством электромагнитного поля: твердого тела и плазмы *).

*) Впрочем, большую часть разделов физики твердого тела можно отнести к статистической механике. Для наших целей нет необходимости детально обсуждать этот вопрос.

Классический и квантовый подуровни на нашей схеме опять не рассматриваются. Преимущественную роль играет квантовая статистика. Классическая статистика справедлива в тех случаях, когда длина волны де Бройля для частиц значительно меньше расстояния между ними.

Наконец, электромагнитные, сильные, слабые и гравитационные взаимодействия объединены на микроскопическом уровне в статистической теории эволюции Вселенной и звезд. Основанием для этого служит то обстоятельство, что все взаимодействия в той или иной мере играют значительную роль в теории строения и развития космических объектов. При огромных плотностях и температурах, которые встречаются внутри звезд и, по-видимому, существовали на ранних стадиях эволюции Вселенной, ядерные и слабые взаимодействия, наряду с электромагнитными и гравитационными, становятся определяющими для большинства процессов (см., например, [20]).

Описать феноменологически процессы, в которых существенную роль играют взаимные превращения элементарных частиц (а они происходят внутри звезд и происходили во Вселенной в целом на ранних стадиях ее эволюции), невозможно. Только статистическая теория, принимающая во внимание индивидуальные акты, способна в принципе дать требуемое описание.

Теорию атомного ядра вряд ли следует относить к теориям макроскопических систем. Хотя число частиц в тяжелых ядрах сравнительно велико, оно все же недостаточно для того, чтобы к ним можно было без каких-либо оговорок применять такое понятие, как температура. Вот атомные реакторы и проблема осуществления управляемых термоядерных реакций должны рассматриваться в данном разделе статистической физики (разумеется, гравитационные взаимодействия в теории реакторов не играют никакой роли).

Перейдем теперь ко второй половине нашей классификационной схемы, к теориям микроскопических объектов. Этот переход представляет собой резкий скачок, связанный со следующим. Если во всех процессах, рассмотренных выше (за исключением движения твердых тел и гравитации), тепловое движение играет существенную роль, то на новом уровне говорить о нем не приходится.

III. Классический уровень. На этом уровне первую клетку занимает классическая механика материальной точки и системы материальных точек. Под механикой материальной точки можно понимать как классическую механику Ньютона, так и релятивистскую механику. Принципиального различия между ними нет. В релятивистской области нужно только учитывать зависимость массы от скорости. Во второй клетке находится теория элементарных электромагнитных процессов, описываемых уравнениями Максвелла — Лоренца. Сильные и слабые взаимодействия не имеют, как уже говорилось, классической сферы применимости, и поэтому следующие клетки остаются пустыми. Согласно существующим представлениям, гравитационные силы при взаимодействии молекул, атомов и элементарных частиц не играют никакой роли вследствие своей малости.

Вообще на классическом уровне выделение различных теорий вполне однозначно и вряд ли вызовет разногласия. Правда, описывая движение атомов и молекул с помощью классической механики, не всегда можно рассматривать их как материальные точки. Нужно в некоторых случаях учитывать моменты инерции атомов и молекул, т. е. считать их твердыми телами очень малых размеров. Но в классической механике это несущественно.

С помощью теорий данного уровня решается целый ряд задач электроники и строится теория ускорителей элементарных частиц.

IV. Квантовый уровень. На квантовом уровне необходимо уже выделить нерелятивистский (а) и релятивистский (б) подуровни. Переход от нерелятивистской теории к релятивистской знаменует существенные изменения.

а) Нерелятивистская теория. Здесь занята лишь одна клетка. В ней располагается нерелятивистская квантовая механика Шредингера — Гейзенберга. Теории электромагнитных и слабых взаимодействий, а также гравитационных взаимодействий не могут не быть релятивистскими, так как фотоны, нейтрино и гравитоны (если они существуют) движутся со скоростью света. Сильные же взаимодействия проявляются в столь малых областях пространства и связаны со столь значительными энергиями, что, за исключением отдельных случаев, описание процессов, обусловленных

этими взаимодействиями, должно быть релятивистским. Поэтому все остальные клетки этого подуровня пусты.

Нерелятивистская квантовая механика охватывает почти всю теорию атомов и молекул. Она составляет основу атомной физики.

б) Р е л я т и в и с т с к а я т е о р и я — это теория движения, взаимодействия и взаимных превращений элементарных частиц. На данном, самом глубоком, уровне теряет смысл деление на теории движения частиц вещества и теории взаимодействий этих частиц друг с другом. Поэтому весь подуровень занят релятивистской квантовой теорией поля. Всем частицам соответствуют определенные поля и всем полям — частицы. Частицам (или полям) каждого данного сорта соответствует свое уравнение движения. Классифицировать теории целесообразно по типам взаимодействий, каждый из которых ответствен в конечном счете за определенные превращения элементарных частиц.

В последней клетке, занятой квантовой теорией гравитации, стоит знак вопроса. Эта теория еще не построена. Из-за связи гравитации со свойствами пространства и времени положение здесь особое по сравнению с другими типами взаимодействий. К тому же пока нет никаких экспериментальных фактов, подтверждающих квантовую природу гравитации. Впрочем, в линейном приближении квантовая теория гравитации существует. Кванты гравитационного поля — гравитоны должны, согласно этой теории, иметь нулевую массу покоя и спин, равный 2 (в единицах \hbar).

Вероятно, с течением времени будет обнаружен еще более глубокий уровень: будет построена единая теория поля.

* * *

Перейдем теперь к соотношению фундаментальных физических теорий, представленных на схеме. Связи между теориями весьма разнообразны. Мы не ставим себе целью исследовать все возможные связи и ограничимся только интересующими нас соотношениями между динамическими и статистическими теориями. Связей между различными динамическими теориями и различными статистическими теориями мы касаться почти не будем, хотя, конечно, сам по себе этот вопрос, несомненно, заслуживает внимания.

На нашей схеме главное разделение по уровням показано двойной линией; это разделение на теории поведения макроскопических систем и теории поведения отдельных микроскопических объектов. Для тех и других характерно, что динамические теории, заключенные на схеме в сплошные рамки, занимают верхний «этаж», а статистические, помещенные в пунктирные рамки, — нижний.

На первый взгляд кажется, что можно обнаружить три типа связей между динамическими и статистическими теориями. К первому типу относятся связи теорий, описывающих один и тот же круг явлений, одну и ту же форму движения материи, присущую макроскопическим системам на макро- и микроуровнях; ко второму — связи теорий, описывающих на различных уровнях поведение отдельных объектов, и, наконец, к третьему — связи динамических теорий поведения индивидуальных объектов со статистическими теориями поведения систем из большого числа этих объектов. Других типов связей нет.

Связи первых двух типов обозначены на схеме жирными сплошными стрелками, идущими вертикально снизу вверх. Связи же третьего типа изображены жирными пунктирными стрелками. В таком способе обозначений заключается следующий смысл: первые два типа связей глубоко родственны, а третий представляет собой нечто совершенно иное.

Действительно, связи первых двух типов — это связи между теориями, описывающими с разных позиций один и тот же круг явлений, одну и ту же форму движения материи. Динамические и статистические теории имеют один и тот же предмет исследования и различаются только методами.

Характер связей третьего типа между динамическими и статистическими закономерностями или, вернее, один из двух аспектов этой связи (поскольку связи первых двух типов мы объединили) коренным образом отличается от предыдущего аспекта. Здесь мы рассматриваем связи между теориями, описывающими явления различной природы, различные формы движения материи, не сводимые друг к другу. Эти теории занимают разные части нашей схемы.

Надо подчеркнуть еще раз следующий момент, важный для нашего исследования: наряду со связью динами-

ческих закономерностей индивидуальных процессов и статистических закономерностей процессов коллективных, имеются дополнительные параллельные связи между статистическими теориями индивидуальных процессов (нерелятивистская квантовая механика и квантовая электродинамика) и статистическими теориями большой совокупности объектов (квантовая статистика и квантовая статистическая теория электромагнитных процессов в макротелах). Эти последние связи показаны на схеме тонкими пунктирными стрелками. Они во многом подобны связям предыдущего типа, но только приводят к квантовым статистическим теориям вместо классических.

Тонкие горизонтальные стрелки на схеме изображают связи классических и квантовых статистических теорий. На схеме показано еще несколько стрелок, обозначающих связи, которые мы в дальнейшем не будем обсуждать. Жирная волнистая стрелка символизирует связь релятивистской и нерелятивистской квантовых теорий. Обе они являются статистическими. Классическая механика твердого тела непосредственно вытекает из механики системы материальных точек. Связь между этими динамическими теориями изображена тонкой волнистой стрелкой.

На этом предварительную подготовку будем считать законченной и перейдем к центральному пункту исследования: формулировке и обсуждению значения различных аспектов соотношения между динамическими и статистическими закономерностями, непосредственно вытекающими из фактического положения вещей, существующего в современной физике. Первый вывод имеет характер простого резюме сказанного ранее.

§ 2. Формулировка двух аспектов проблемы соотношения динамических и статистических закономерностей

Вся совокупность изложенных выше фактов совершенно бесспорно, как нам представляется, доказывает существование двух аспектов вопроса о соотношении между динамическими и статистическими закономерностями, резко отличающихся друг от друга.

В первом аспекте это соотношение выступает в следующем плане: *законы поведения индивидуальных объектов являются динамическими, а поведение большой сово-*

купности этих объектов подчиняется статистическим законам.

В физике, как непосредственно следует из предыдущего рассмотрения, мы имеем в чистом виде два таких случая, а именно: 1) соотношение между классической механикой Ньютона и классической статистической механикой и 2) соотношение между динамической теорией индивидуальных электромагнитных процессов и макроскопической электродинамикой, описывающей поведение большой совокупности заряженных частиц.

Наиболее существенно для данного аспекта проблемы с общей точки зрения то обстоятельство, что здесь *соответствующие динамические и статистические законы описывают разные формы движения материи, не сводимые друг к другу.* Так, классическая механика рассматривает чисто механическую форму движения материи, а статистическая механика — тепловую форму движения, для которой механическое движение составляет лишь необходимый фундамент, но не исчерпывает ее. Точно так же электромагнитные процессы в макротелах ответственны за такую форму движения, которую нельзя полностью свести к элементарным электромагнитным явлениям.

Существование данного аспекта проблемы не оставляет никаких сомнений. О нем пишут практически все авторы, исследующие соотношение между динамическими и статистическими закономерностями. Более того, у многих авторов он выступает как единственный аспект, и они сводят исследование проблемы соотношения различных типов закономерностей к анализу связи классической механики и классической статистики. (Статистическим и динамическим закономерностям электромагнитных процессов уделяют меньшее внимание.)

Но кроме сформулированного выше аспекта проблемы существует еще совершенно иной ее аспект, на который обычно не обращают должного внимания. Обращаясь ко второму аспекту, мы будем интересоваться следующим: *каково соотношение между динамическими и статистическими законами, описывающими один и тот же круг явлений, одну и ту же форму движения материи?*

В классической, доквантовой физике можно указать, как уже говорилось ранее, три примера описания одного и того же круга явлений закономерностями различного типа. К ним относятся: 1) классическая термодинамика и

статистическая механика (точнее, статистическая термодинамика), дающие теорию тепловых явлений; 2) механика сплошных сред и статистическая теория деформируемых сред (или, в более общем виде, феноменологическая и статистическая теории неравновесных процессов); 3) макроскопическая электродинамика Максвелла и микроскопическая электродинамика. С появлением квантовой теории число таких областей знания не только увеличилось, но, как нам кажется, создалась обстановка, поставившая под сомнение значение первого аспекта проблемы. Во всяком случае, в его сравнении со вторым.

При такой ситуации совершенно недопустимо игнорировать существование двух различных аспектов проблемы соотношения динамических и статистических закономерностей и вести анализ так, как будто бы существует или является важным только один. *Выделение двух аспектов проблемы соотношения динамических и статистических закономерностей является центральным моментом всего нашего исследования.* На существование двух аспектов проблемы до сих пор не обращается должного внимания *).

Положение еще более усугубляется тем, что первый аспект, на котором обычно и сосредоточивается все внимание, отнюдь нельзя считать главным при анализе соотношения закономерностей двух типов. Подчеркивание основополагающего значения второго аспекта (соотношение между закономерностями, трактующими один и тот же круг явлений) — следующий основной момент нашего исследования.

К доказательству фундаментального значения именно второго аспекта проблемы мы и перейдем в дальнейшем.

§ 3. Связь низших и высших форм движения материи и соотношение между динамическими и статистическими закономерностями

Остановимся сначала несколько подробнее на содержании и значении первого аспекта проблемы соотношения динамических и статистических закономерностей; согласно которому динамические законы описывают поведение индивидуальных объектов, а статистические —

*) Существование двух аспектов проблемы соотношения динамических и статистических закономерностей было впервые подчеркнуто в статье автора [9].

поведение большой совокупности этих объектов, взаимодействующих друг с другом.

Исторически именно этот аспект возник первым сразу же после создания Больцманом кинетической теории газов. Иначе, естественно, и не могло быть, поскольку никакие другие статистические теории, в которых бы использовалось понятие вероятности, кроме статистической механики, не были известны. Но, к сожалению, очень часто и в настоящее время именно его имеют в виду, когда говорят о соотношении динамических и статистических закономерностей. Далее делается вывод о первичности динамических закономерностей, статистические закономерности воспринимаются как некая надстройка над динамическими. Картина соотношения двух типов законов представляется на первый взгляд с завидной ясностью, не допускающей никаких инотолкований. Начинает казаться, что изучение соотношения статистических законов и динамических есть один из моментов общего исследования отношения высших форм движения материи (в данном случае — больших коллективов объектов) к низшим формам (движения отдельных частиц). Вот эта кажущаяся простота и очевидность, вероятно, привела к тому, что до сих пор сохраняется влияние идей столетней давности, лишенных, в сущности, достаточного обоснования. Ведь даже путем внимательного анализа только классических физических теорий можно было бы прийти к выводу, что данный аспект проблемы (названный у нас первым) не только не является единственным, но его даже нельзя считать главным.

Однако в настоящее время проводить такой анализ, не выходя за рамки классических теорий, уже нет никакого смысла. До появления квантовой механики еще можно было думать, что именно первый аспект является наиболее общим и, следовательно, наиболее важным, а не второй. Можно было считать, что поведение индивидуальных объектов всегда подчиняется динамическим законам, а поведение совокупности объектов имеет статистический характер. Низшие, простейшие формы движения подчиняются динамическим законам, а высшие, более сложные — статистическим. То же обстоятельство, что совокупность большого числа частиц описывается как феноменологическими динамическими законами, так и более глубокими статистическими, несущественно в целом для выяснения вопроса о соотношении этих законов.

Правда, и до появления квантовой механики был один случай, не вполне соответствующий данной точке зрения. Речь идет здесь о броуновском движении, при котором поведение отдельных частиц подчиняется статистическому закону. Но только с появлением квантовой механики положение кардинальным образом изменилось. Как уже отмечалось в гл. II, было установлено, что соотношение между законами поведения индивидуальных объектов и законами поведения их совокупности совсем не обязательно совпадает с соотношением между динамическими и статистическими законами. *Для соотношения между низшими и высшими формами движения в физике не характерно, что первая описывается динамическими законами, а вторая — статистическими.* То обстоятельство, что это справедливо для классической механики и классической статистики, никак не связано с соотношением между низшими и высшими формами движения материи. Точно такое же соотношение, как было показано ранее, существует между квантовой механикой и квантовой статистикой. Эти теории описывают различные формы движения, но обе относятся к статистическим.

Основной вопрос, возникающий при выяснении соотношения высших и низших форм движения для рассматриваемого случая механики и статистики, состоит в следующем: *как связано поведение совокупности в целом и поведение единичных объектов данной совокупности?* И вот для этой связи оказывается нехарактерным, что совокупность ведет себя согласно статистическим законам, а отдельные объекты — динамическим. Законы поведения как совокупности, так и отдельных частиц могут быть статистическими.

В философском отношении ошибка при выдвижении первого аспекта проблемы соотношения между динамическими и статистическими закономерностями в качестве основного заключается в возведении без всякого на то основания несущественного, случайного в ранг существенного, необходимого. К такому выводу можно было прийти (и к нему действительно пришли) в прошлом, в конце XIX века, когда классическая статистика только что была создана, а другие статистические законы еще не были известны.

Да, бесспорно, соотношение законов классической статистики и классической механики есть соотношение статистических законов поведения совокупности и дина-

мических законов поведения индивидуальных частиц. Но столь же бесспорно, что соотношение законов квантовой статистики и квантовой механики есть соотношение статистических законов коллектива и статистических законов поведения членов этого коллектива в отдельности. В свете сказанного утверждение о том, что первый аспект проблемы является основным, представляет собой прямую ошибку.

Итак, проблема соотношения поведения совокупности и поведения отдельных ее элементов по своей природе совсем не совпадает с проблемой соотношения статистических законов и динамических. Более того, первая проблема гораздо сложнее второй, если последнюю понимать правильно, т. е. как соотношение между законами, трактующими один и тот же круг явлений, одну и ту же форму движения материи. Фактически вторая проблема, в общем-то, может считаться решенной. Трудно усмотреть какие-либо принципиальные неясности в проблеме соотношения между термодинамикой и статистической термодинамикой или между классической механикой и квантовой.

Проблему же соотношения высших и низших форм движения и, в частности, особо важную для нашего исследования проблему отношения поведения совокупности частиц к поведению отдельных частиц еще никак нельзя считать решенной, несмотря на несомненные успехи в этом направлении, начало которым было положено Больцманом.

Отсутствие ясности в проблеме обоснования статистической механики легко обнаружить, просмотрев ряд учебников и монографий по статистической механике. В своей незаконченной монографии Крылов [21] утверждает, что основные положения классической статистики не только нельзя обосновать на базе классической механики, но нельзя и согласовать с ней. В курсе Ландау и Лифшица [22] содержится более осторожное высказывание о том, что в настоящее время не ясно, можно ли обосновать с помощью классической механики закон возрастания энтропии. Тер-Хар [23] считает, что можно обосновать как классическую, так и квантовую статистики, если сделать некоторые предположения, которые хотя и не вытекают из механики (классической или квантовой), но представляются самому автору достаточно естественными. Терлецкий вообще не усматривает в данном вопро-

се каких-либо принципиальных трудностей, считая, что работы Больцмана в основном исчерпывают проблему*). В общем, довольно трудно найти два руководства по статистической физике, в которых бы соотношение между статистической физикой и механикой системы частиц освещалось согласованным образом.

При обосновании статистической механики встречаются трудности двух типов. Во-первых, трудность в согласовании обратимости законов движения микрочастиц с необратимостью макроскопических процессов в изолированных или почти изолированных системах**) и, во-вторых, трудность применения статистической механики к миру как целому.

Статистическая физика приводит к согласующемуся с опытом факту возрастания энтропии в том случае, если допустить равную вероятность всех микросостояний, отвечающих данному макросостоянию в некоторый момент времени t_0 изолированной или почти изолированной системы. Подавляющее число микросостояний соответствует эволюции системы в направлении установления равновесия, и поэтому с вероятностью, очень мало отличающейся от единицы, энтропия системы будет возрастать, как того требует второе начало термодинамики.

Но данное макросостояние в момент времени t_0 в свою очередь возникло из какого-то предшествующего состояния в результате происходящих в природе процессов. Вследствие обратимости законов механики следует ожидать, что энтропия системы будет возрастать не только при $t > t_0$, но и при $t < t_0$. Иными словами, при $t = t_0$ энтропия должна иметь минимум (рис. 13, сплошная кривая). Однако в действительности его нет. Энтропия в реально осуществляющихся в природе замкнутых системах всегда возрастает.

Чтобы получить возрастание энтропии в прошлом, как отмечает Давыдов [24] в дискуссии с Терлецким, придется отодвигать момент t_0 все дальше и дальше в прошлое. Если мы остановимся на каком-то моменте, отстоящем на

*) Мы имеем здесь в виду книгу Я. П. Терлецкого «Статистическая физика» (изд-во «Высшая школа», М., 1966 г.).

**) Под почти изолированной системой понимается система, взаимодействие которой с окружающими телами настолько мало, что на протяжении достаточно большого интервала времени ее можно считать изолированной. Полностью изолированных систем, строго говоря, не существует.

конечное время от настоящего, то нам все-таки придется сказать, что до этого момента энтропия убывала в макроскопических масштабах.

Таким образом, хотя путем предположения о равновероятности состояний в избранный момент времени t_0 мы и можем в статистической физике получить закон возрастания энтропии в видимой части Вселенной, но тогда она должна была бы убывать в течение длительного времени в столь же обширной части Вселенной.

Согласно Крылову, положение оказывается еще более сложным. Допущение равновероятности микросостояний в области фазового пространства $\Delta\Gamma_0$, выделенной заданием макросостояния, не только нельзя обосновать с помощью классической механики, но его нельзя даже ввести в ее рамках в качестве дополнительного постулата. В самом деле, наличие равновероятного распределения микросостояний, равно как и лю-

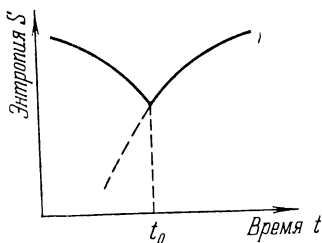


Рис. 13.

бого другого закона распределения, не может быть законом природы, вытекающим из классической механики. Ведь фактически утверждение о существовании определенного закона распределения в момент t_0 означает наличие закономерных связей между начальными значениями координат и импульсов частиц системы. Но начальные условия как раз и относятся к тем элементам поведения систем в механике, которые совершенно не зависят от ее законов, т. е. законов природы, управляющих движением. Эти условия могут быть любыми. Как отмечает Вигнер [18], самое удивительное открытие эпохи Ньютона состояло в безусловном отделении законов природы от начальных условий. Первые невообразимо точны, а о вторых мы, в сущности, ничего не знаем.

Другой аргумент Крылова против возможности обоснования классической статистики на базе классической механики, независимый от первого, состоит в следующем. Наблюдаемые на опыте системы, находящиеся в одном и том же макросостоянии, каким-то образом распределены по микросостояниям, причем в принципе можно установить их распределение эмпирически. В результате

экспериментов по определению микросостояний образуется некоторый ансамбль, называемый Крыловым реальным. Так вот, распределение в этом ансамбле не может быть равномерным. Дело в том, что области фазового пространства $\Delta\Gamma_0$, выделяемые макроскопическим опытом, вследствие возможности различного выбора определяемых параметров, а также точности измерений могут в достаточно широких пределах менять свою форму; они могут частично перекрываться. Поэтому любую пару областей, выделяемых различными макроскопическими опытами, можно соединить цепью попарно перекрывающихся областей. А это означает наличие равномерного распределения по всей поверхности заданной энергии, т. е. наличие теплового равновесия. Таким образом, предположение о равновероятном распределении микросостояний в области фазового пространства, выделяемой макроскопическим опытом, приводит к заключению о невозможности неравновесных состояний и тем самым к непосредственному противоречию с опытом.

Изложенное выше служит еще одним аргументом в пользу того, что соотношение между классической механикой и классической статистикой не может служить образцом при попытках решения проблемы соотношения между динамическими и статистическими закономерностями в целом. Имеются, как мы видели, некоторые основания считать, что классическая механика микрообъектов не годится для обоснования статистической физики. Во времена Больцмана, когда не допускалось и мысли о возможности существования микромеханики, отличной от механики Ньютона, никаких сомнений в том, что статистическая механика базируется на законах классической механики, естественно, не могло возникнуть. Но после создания квантовой механики, независимо от убедительности высказанных аргументов, вывод о том, что статистическую механику и классическую механику невозможно согласовать, становится в принципе допустимым.

Подчеркнем, что речь может идти именно только о *согласовании*, а не о выводе законов классической статистики с помощью законов Ньютона. При переходе от динамических законов к статистическим необходимо делать те или иные вероятностные предположения о начальных распределениях координат и импульсов частиц, так как в основе одного статистического распределения

всегда лежит другое распределение. Вероятность всегда следует только из вероятности, и если постулативно не ввести в теорию вероятностных предположений, то в рамках динамической теории они сами собой не возникнут.

Выход из трудностей объяснения необратимости макроскопических процессов на основе законов движения микрочастиц Крылов вполне определенно, а Ландау и Лифшиц и ряд других авторов предположительно надеются найти в квантовой механике. Согласно Крылову, нужно учитывать, что макроскопическая характеристика состояния системы и микроскопическое описание связаны боровским принципом дополнительности. Уточнение состояния системы внутри области фазового пространства, выделенной макроскопическим опытом, невозможно без нарушения макросостояния. Однако эта идея не получила надлежащего развития (сам Крылов скончался, не закончив исследования).

Ландау и Лифшиц, Давыдов и др. считают, что решение проблемы необратимости связано с неэквивалентностью обоих направлений времени в квантовой механике. Хотя само уравнение Шредингера обратимо во времени, процесс измерения, связанный с переходом системы из чистого состояния, описываемого волновой функцией, в смешанное состояние, характеризуемое набором волновых функций с соответствующими статистическими весами (матрицей плотности), во времени необратим. Но до сих пор отсутствуют какие-либо убедительные доказательства наличия связи между необратимостью макроскопических процессов и неэквивалентностью обоих направлений времени при квантовомеханических измерениях, сводящихся к взаимодействию микросистемы с прибором — большой системой, функционирование которой подчинено законам классической механики.

Есть все основания сомневаться в правомерности попыток объяснить необратимость макропроцессов ссылкой на квантовую механику, т. е. считать, что при $\hbar \rightarrow 0$ закон возрастания энтропии перестает быть справедливым. Ведь, в конце концов, пусть для частных задач, но классическая статистическая механика вполне строго приводит к возрастанию энтропии в замкнутых системах. И трудно поверить, что возрастание энтропии, скажем при перемешивании двух газов, в конечном счете связано с квантовыми эффектами. В сущности, при этом происходит процесс увеличения беспорядка внутри системы,

имеющий принципиально тот же характер, что и «перемешивание» книг в библиотеке, если забывать ставить каждую книгу на отведенное ей место. Утверждение о том, что, казалось бы, классический эффект возрастания энтропии есть, по существу, эффект квантовый, представляется слишком сильным для того, чтобы отстаивать подобную точку зрения без подкрепления ее конкретным анализом. Тем более, что, как мы увидим в дальнейшем, можно наметить другой выход из имеющихся трудностей.

Распространенное обоснование квантовой статистики, данное в работах фон Неймана, Паули и др. и подробно рассмотренное в обзоре Тер-Хара, принципиально не отличается от попыток обоснования классической статистики на основе механики Ньютона. Опять нужно вводить предположение о равенстве априорных вероятностей для равных объемов фазового пространства, эквивалентное предположению о равновероятности микросостояний в начальный момент времени. Кроме того, при обосновании квантовой статистики дополнительно приходится предполагать, что начальные фазы амплитуд вероятности распределены случайным образом.

Итак, существующие попытки обоснования классической и квантовой статистик не отличаются принципиально друг от друга, и встречающиеся при этом трудности имеют, в общем-то, одинаковый характер. Это происходит потому, что применение статистического подхода к исследованию макроскопических тел как в классическом, так и в квантовом случае возможно только благодаря наличию огромного числа частиц в системах.

После появления монографии Боголюбова [106] начался новый этап развития кинетической теории необратимых процессов. В результате работ Боголюбова, Ван Хоа, Пригожина и др. природа необратимости процессов получила новое освещение [25]. Эти работы, относящиеся к физической кинетике, имели своей целью развитие более строгих методов вывода кинетических уравнений на основе уравнений движения, описывающих поведение отдельных частиц.

Предшествующие методы получения как классического кинетического уравнения Больцмана, так и основного кинетического уравнения Паули страдали существенными недостатками. Еще П. и Т. Эренфесты заметили, что при выводе уравнения Больцмана фактически используется допущение о том, что движения молекул газа

не коррелированы между собой перед каждым столкновением (т. е. их движения совершенно независимы). Соответственно при выводе основного квантового кинетического уравнения используется гипотеза случайных фаз не только в начальном, но и в промежуточных состояниях. Это обстоятельство представляется странным. Отсутствие корреляций перед каждым взаимодействием означает, что система «забывает» свою предысторию. Тогда непонятно, каким образом возможна односторонняя направленность эволюции системы во времени. И действительно, Ван Хов показал, что если фазы распределены случайно во все моменты времени, то система должна находиться в состоянии полного равновесия [26].

В дальнейшем Боголюбов в рамках классической механики, а Ван Хов и др. в рамках квантовой механики выявили требования, выполнение которых необходимо для получения кинетических уравнений, описывающих необратимые процессы. В число этих требований не входит допущение об отсутствии корреляций перед каждым столкновением. Во-первых, необходимо предположить, что число частиц N в системе бесконечно и она занимает бесконечный объем V , но отношение N/V остается конечным; кроме того, нужно допустить, что свойства реальной большой, но конечной системы не отличаются значительно от свойств бесконечной системы. Во-вторых, налагаются некоторые условия на гамильтониан системы взаимодействующих частиц.

Для того чтобы получить уравнения, описывающие необратимые процессы, необходимо, кроме того, наложить определенные ограничения на возможные начальные состояния системы. В формулировке Боголюбова это требование сводится к допущению так называемого ослабления корреляций. Физическая сущность этого условия состоит в том, что вводится принципиальное различие между поведением системы до выделения начального момента времени и после него. До выделенного момента времени в интервале $t - t_c$, где t_c — время столкновения, любая пара частиц считается невзаимодействующей, и соответственно в начальном состоянии системы отсутствуют корреляции. После взаимодействия частиц возникает корреляция состояний, и именно поэтому их поведение до и после выделенного момента оказывается различным. Необратимость получается из-за того, что обращение во времени «состарившегося»

состояния дает другой результат, так как теперь уже взаимодействия (столкновения) будут происходить между молекулами, состояния которых не независимы.

В квантовой теории в принципе ничего нового нет. Только отсутствие корреляции в начальном состоянии означает некогерентность фаз волновых функций, при которой можно пренебречь интерференционными членами.

Таким образом, с данной точки зрения необратимость связана с тем, что мы никогда не имеем дело с системами, в которых существует корреляция между начальными состояниями. В рамках квантовой статистики это означает, что в начальном состоянии фазы всегда некогерентны. Такое предположение можно считать эквивалентным предположению о равновероятности микросостояний в начальный момент, о которой шла речь выше.

Несомненно, что перечисленные работы имеют очень важное значение для развития статистической теории неравновесных процессов. Но считать, что они решили проблему согласования обратимого характера движения отдельных частиц с необратимым характером поведения больших совокупностей частиц нельзя. Фактически начальное состояние каждый раз должно быть специально «приготовлено» так, чтобы оно оказывалось некоррелированным. А ведь, несмотря на обратимость движения отдельных частиц, все процессы в окружающей нас природе имеют определенную направленность без какого-либо «приготовления» начальных состояний. Приходится вводить «понятие о наблюдателе, искусственно «изготовившем» в некоторый момент времени замкнутую систему так, чтобы вопрос о ее предыдущем поведении вообще отпал; такое связывание физических законов со свойствами наблюдателя, разумеется, совершенно недопустимо». Это утверждение ([22], стр. 471) Ландау и Лифшица представляется нам совершенно справедливым.

Теперь остановимся на второй проблеме — трудностях, связанных с применением второго начала ко всей Вселенной. Если применить положения статистической механики к Вселенной, существующей неограниченно во времени, то мы, казалось бы, с необходимостью должны прийти к выводу, что Вселенная (или, точнее, любая сколь угодно большая ее часть) должна находиться в состоянии термодинамического равновесия. Время релаксации любой конечной области не может быть беско-

нечным ([22], стр. 45). В действительности же ничего подобного не наблюдается. Вся та часть Вселенной, откуда поступает к нам информация (вплоть до ее частей, удаленных на огромные расстояния, проходимые светом за миллиарды лет), находится в очень далеком от равновесного состояния. Сконцентрированная в галактиках и звездах материя непрерывно теряет энергию, рассеивающуюся в пространстве, что ведет к сложной цепи эволюции звездных систем, звезд и планет. Все процессы происходят с возрастанием энтропии. На основании этих фактов высказывается гипотеза (впервые выдвинутая Клаузиусом в XIX веке) о неизбежности тепловой смерти Вселенной.

Конечно, можно выразить уверенность в том, что по неясным нам пока причинам тепловая смерть не наступит никогда, поскольку она не наступила до сих пор за бесконечное время существования Вселенной.

Но что привело Вселенную в теперешнее неравновесное состояние и что может предотвратить ее переход в состояние равновесия в дальнейшем? Это один из самых грандиозных вопросов, которые может поставить человечество. Возможность в наше время научного подхода к исследованию эволюции Вселенной — самое яркое свидетельство огромных успехов науки.

Прогресс в решении проблемы эволюции Вселенной, как нам представляется, позволит окончательно выяснить вопрос о согласовании обратимых законов микромеханики с наблюдаемой необратимостью макропроцессов.

Первая попытка научного подхода к проблеме эволюции Вселенной принадлежит Больцману. Неравновесное состояние видимой части Вселенной возникло, согласно Больцману, в результате гигантской флуктуации. Подавляющую часть времени Вселенная находится в состоянии равновесия с максимальным значением энтропии S . Но имеется конечная вероятность спонтанного выхода из состояния равновесия огромного участка Вселенной, при котором энтропия уменьшается. Затем, достигнув некоторого минимального значения, она вновь начинает возрастать (рис. 14).

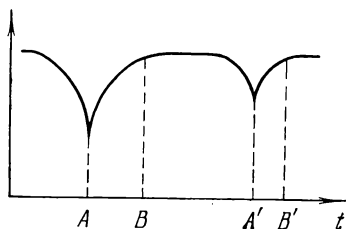


Рис. 14.

Конечно, такая флуктуация — исключительно маловероятное событие. Но удивляться тому, что мы тем не менее ее наблюдаем, нет основания. Жизнь может возникнуть только в промежутки времени AB , $A'B'$, когда энтропия растет. Флуктуация — необходимое условие появления разумных существ, которые могли бы ее наблюдать.

Следует особо подчеркнуть, что гипотеза Больцмана не только предлагает решение проблемы эволюции Вселенной, но и позволяет в принципе согласовать необратимость макропроцессов с обратимостью микропроцессов. В самом деле, для объяснения необратимого характера изменения состояния почти изолированной системы совсем не обязательно требовать равновероятность микроскопических состояний, отвечающих данному макроскопическому состоянию системы (согласно Крылову это недопустимо). Для объяснения одностороннего изменения энтропии (ее возрастания) необходимо лишь такое распределение по микросостояниям, при котором большинство последних отвечало бы росту энтропии в будущем и уменьшению в прошлом. Законы классической, а равно и квантовой механики не позволяют делать каких-либо заключений о начальном состоянии системы. Оно определяется закономерностями развития Вселенной. Энтропия возрастает внутри окружающих нас систем просто потому, что эволюция мира как целого (или большого участка, захваченного больцмановской флуктуацией) привела к сильно неравновесному состоянию систем с соответствующими микросостояниями. Статистическая механика сама по себе не способна объяснить наличие в настоящее время в системах таких распределений по микросостояниям, которые ведут к одностороннему изменению энтропии. Но если считать существование таких распределений фактом, обусловленным эволюцией Вселенной, то никаких противоречий между микромеханикой и статистической физикой не будет. Обратимое изменение энтропии вытекает только из предположения о равновероятности микросостояний в начальный момент.

Приведенные аргументы снимают сомнения в том, что законы классической статистики можно согласовать с классической механикой. Отпадает и упомянутое выше возражение Давыдова. Момент t_0 , когда все микросостояния равновероятны, — это момент, когда энтропия

Вселенной имела минимум при больцмановской флуктуации.

Таким образом, проблема обоснования статистики должна быть связана с решением проблемы эволюции Вселенной в целом. Изолировать друг от друга трудности в фундаментальных вопросах статистической физики — значит заранее отказаться от преодоления одной из них.

Центральной, следовательно, оказывается проблема эволюций Вселенной. И здесь надо признать, что, несмотря на привлекательность флуктуационной гипотезы Больцмана, способной на первый взгляд решить все трудности, ее все же нужно считать несостоятельной. Одна из причин ее несостоятельности проста. Флуктуация тем более вероятна, чем меньше размеры охватываемой ею системы. В области порядка размеров солнечной системы вероятность флуктуаций значительно больше, чем в видимой части Вселенной. А для возникновения жизни достаточно в принципе флуктуации в масштабах солнечной системы или Галактики. Поэтому главный аргумент Больцмана в пользу возможности наблюдения крайне маловероятного события — космической флуктуации — оказывается несостоятельным. И вряд ли спасает положение замечание Терлецкого о том, что флуктуации плотности и других величин, бесспорно, стремятся к нулю при стремлении числа частиц к бесконечности только для идеального газа. Для систем же тел, взаимодействующих посредством дальнедействующих гравитационных сил, можно ожидать, что величина флуктуаций будет увеличиваться с ростом числа частиц.

Бесплодность попыток возрождения и модернизации гипотезы Больцмана стала вполне очевидной после создания Эйнштейном на базе общей теории относительности релятивистской космологии. Лишь на основе новой теории гравитации стало возможным быстрое развитие теории эволюции Вселенной. Теория эволюции, не учитывающая релятивистскую космологию, в настоящее время немыслима.

Главное открытие в этой области — создание основ теории расширяющейся Вселенной — было сделано Фридманом в 1922 г. Предположив, что в среднем Вселенная однородна и изотропна, он нашел нестационарное решение уравнений гравитационного поля Эйнштейна для Вселенной в целом. Впоследствии вывод о расширении Вселенной был подтвержден экспериментально

Хабблом путем наблюдения красного смещения света от далеких галактик. Недавнее открытие равновесного космического (реликтового) излучения с температурой около 3°K , предсказанного теорией, значительно увеличило уверенность в ее справедливости.

В первоначальной концепции Фридмана эволюция Вселенной выглядит следующим образом. В настоящий момент Вселенная, очевидно, расширяется. Но что произойдет в дальнейшем? Согласно теории ее будущее зависит от соотношения между средней плотностью ρ материи Вселенной в данный момент и некоторой критической плотностью $\rho_k = \frac{3}{8\pi} \frac{H^2}{\gamma}$, где γ — гравитационная постоянная, а H — постоянная Хаббла в данный момент времени, которая определяет скорость расширения Вселенной.

Если $\rho < \rho_k$, то расширение Вселенной никогда не прекратится. Галактики разойдутся на сколько угодно большие расстояния, и какая-либо связь между ними практически исчезнет. Но если $\rho > \rho_k$, то с течением времени расширение Вселенной сменится сжатием и место красного смещения займет фиолетовое. Итак, чтобы знать будущее Вселенной, надо знать среднюю плотность материи (критическая плотность $\rho_k \approx 2 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$).

По последним данным (оценка Оорта), $\rho \approx 5 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$, т. е. $\rho < \rho_k$, если учитываются только массы галактик. Однако в действительности плотность больше за счет метагалактического ионизированного водорода, нейтрино и погасших (коллапсировавших) звезд. Оценить экспериментально вклад метагалактического газа, нейтрино и погасших звезд пока невозможно. Поэтому отнюдь не исключено, что $\rho > \rho_k$.

Отметим попутно, что значение средней плотности материи определяет пространственную структуру Вселенной как целого. При $\rho > \rho_k$ средняя кривизна мира положительна и Вселенная, оставаясь безграничной, конечна по своим размерам (закрытая модель). При $\rho < \rho_k$ кривизна отрицательна и Вселенная бесконечна (открытая модель).

Что можно сказать о прошлом Вселенной? По теории Фридмана когда-то в прошлом Вселенная была сжата в очень малом объеме, в точку, согласно решению исходных уравнений, причем плотность материи была бесконечно велика. Если принять эту особую точку в решении урав-

нений за начало отсчета $t = 0$, то можно оценить время расширения Вселенной. Оно оказывается равным примерно 10 миллиардам лет. При $\rho > \rho_k$ сжатие опять должно привести Вселенную в состояние с бесконечной плотностью. На рис. 15 изображено изменение пространственных масштабов в открытой (а) и закрытой (б) моделях Фридмана.

Обе модели удовлетворительно описывают экспериментальные факты относительно красного смещения, объясняют происхождение современного нестационарного состояния Вселенной, но встречаются с существенными трудностями.

Главная трудность связана с особой точкой в начальный момент эволюции и в конечный (для закрытой модели). Гипотеза о сотворении мира в момент $t = 0$, очевидно, абсолютно ненаучна. Один из путей

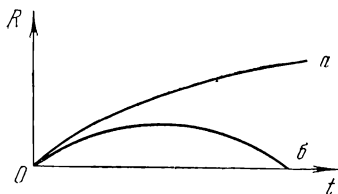


Рис. 15.

обхода трудности состоит в допущении, что до начального момента $t = 0$ понятие времени вообще лишено смысла, так как пространство и время неотделимы от материи. Можно также считать, что при t , близком к нулю, нельзя пользоваться известными представлениями о пространстве и времени, так что утверждения о конечности или бесконечности времени теряют смысл.

Данные соображения, не очень убедительные сами по себе, не снимают трудностей для Вселенной в будущем. Правда, в нестационарной модели Вселенной тепловая смерть ей непосредственно не угрожает. Но будущее Вселенной довольно безрадостно и ее все равно ожидает смерть. В закрытой модели Вселенная сожмется в точку и фактически перестанет существовать. Если $\rho < \rho_k$, то она будет неограниченно расширяться, взаимодействие между ее различными частями практически прекратится и наступит качественное вырождение Вселенной, которое ничуть не лучше ее тепловой смерти.

В связи с указанными затруднениями предпринимались и предпринимаются многочисленные попытки модификации первоначальной модели расширяющейся Вселенной. Прежде всего, обращалось внимание на то, что вблизи особой точки сами уравнения гравитации

могут оказаться несостоятельными, хотя эти уравнения и не содержат внутри себя какие-либо ограничения на величину плотности материи. Ведь общая теория относительности не учитывает квантовых эффектов, а они обязательно должны проявиться на сверхмалых расстояниях. Далее, особенности в решении Фридмана уравнений для гравитационного поля для прошлого и для будущего появляются только при требовании однородности и изотропности Вселенной. Однако и при самых общих начальных условиях, согласно работе Лифшица и Халатникова [27], особенности в решении уравнений гравитации остаются. Плотность Вселенной обращается в бесконечность, но только радиус Вселенной меняется не монотонно, а испытывает бесконечное число осцилляций вблизи сингулярной точки.

Таким образом, проблема в целом остается нерешенной. Можно допустить, что сжатие Вселенной должно сменяться ее расширением, но непонятно, в силу каких причин это может произойти. Последнее положение подчеркнуто в монографии [20] и в книге Хойла [28]. Увеличение давления при сильном сжатии в однородной Вселенной не может быть причиной ее последующего расширения, так как в ней давление распределено строго равномерно. Между различными частями Вселенной поэтому нет разности давлений и нет силы, которая могла бы остановить сжатие. Вопрос о возможности прохождения Вселенной через особую точку остается нерешенным. Уравнения гравитации Эйнштейна такого решения не дают. Но это, конечно, не означает принципиальной невозможности смены сжатия расширением, так как нет никакой гарантии, что при сверхплотных состояниях вещества эти уравнения останутся справедливыми.

К более разнообразным моделям эволюции Вселенной приводят уравнения с так называемой космологической постоянной Λ , впервые введенной Эйнштейном. Ее физический смысл — отталкивание, свойственное пустому пространству. При учете космологической постоянной получаются уравнения поля, часть решений которых не содержит особенностей, а часть обладает особыми точками. На рис. 16, *а* приведена модель эволюции Вселенной, учитывающая Λ -член, с конечным временем и на рис. 16, *б* — модели с бесконечным временем. В первой модели сохраняются трудности с началом и концом Вселенной, а во второй — только трудности с ее концом.

Интерес к данным моделям повысился в последнее время в связи с обнаружением необычных деталей в спектрах поглощения квазаров, которые можно объяснить, допустив, что на каком-то этапе расширение Вселенной было

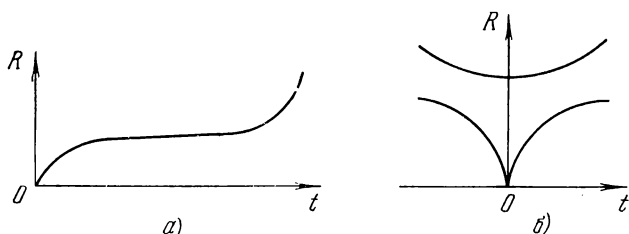


Рис. 16.

сильно заторможено (см. рис. 16, *a*). Такой характер расширения Вселенной можно получить лишь в модели с Λ -членом.

Наконец, предложены модели пульсирующей Вселенной, в которых сжатие и расширение попеременно сменяют друг друга. Если допустить, как это делает Зельдович [29], что энтропия растет от цикла к циклу,

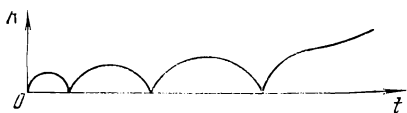


Рис. 17.

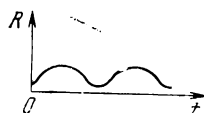


Рис. 18.

то при осцилляциях должно происходить постепенное увеличение радиуса Вселенной и наконец необратимое расширение (рис. 17).

Так как энтропия конечна, то в прошлом можно допустить существование только конечного числа циклов. Таким образом, трудность с начальным состоянием не устраняется. Сохраняется и вывод о необратимом качественном изменении свойств Вселенной при неограниченном ее расширении в будущем. Только в модели осциллирующей Вселенной с сохраняющейся в среднем энтропией пульсации длятся неограниченно долго (рис. 18).

В настоящее время прямые экспериментальные факты (например, красное смещение) не позволяют сделать од-

нозначный выбор между различными космологическими моделями. Все они более или менее удовлетворительно объясняют эти факты. Одни модели (модели с конечным временем) непосредственно вытекают из существующих уравнений гравитационного поля, другие, допускающие переход через сингулярную точку и в особенности осциллирующие модели, не имеют сейчас строгого математического обоснования. Тем не менее, исходя из общих философских соображений, предпочтение нужно оказать осциллирующей модели с постоянной в среднем по осцилляциям энтропией. Иначе мы с неизбежностью приходим к выводу, что современное состояние Вселенной — это не более, чем отдельный эпизод в ее эволюции, который уже никогда не повторится даже приблизительно, и деградация Вселенной, а следовательно и материи, неизбежна.

В осциллирующей модели (рис. 18) современное неравновесное состояние Вселенной не является исключительным, а повторяется с течением времени неограниченное число раз. Ни в какой форме смерть не угрожает Вселенной. *Эта и только эта модель позволяет в принципе согласовать обратимость законов микромира с наблюдаемой в настоящее время необратимостью макроскопических процессов во Вселенной.* Возрастание энтропии на участке расширения Вселенной в равной мере согласуется с законами как классической микромеханики, так и квантовой. Только в сверхплотных состояниях Вселенной, по всей вероятности, окажется необходимым учет квантовых эффектов, и, следовательно, характер изменения энтропии при современном состоянии мира обусловлен существенно квантовыми законами поведения частиц на определенных этапах эволюции нашей Вселенной.

Важно отметить, что теорию пульсирующей Вселенной можно рассматривать как современный аналог флуктуационной гипотезы Больцмана. В ней вместо флуктуационного механизма, периодически возвращающего Вселенную к жизни, действует более глубокий механизм гравитационных взаимодействий современной теории поля и, возможно, неизвестные еще нам законы поведения материи в сверхплотных состояниях. Общие же выводы о причинах необратимости макропроцессов в окружающем нас сейчас мире и о невозможности тепловой (и любой другой) смерти Вселенной носят сходный характер. По-

этому повторять приведенные выше соображения на этот счет нет нужды.

К сожалению, сейчас при выборе моделей Вселенной и детальной разработке определенных моделей редко пользуются соображениями общего порядка. При той неопределенности в выборе моделей, которая существует в современной науке, нам представляется наиболее перспективной разработка осциллирующей модели. Эта модель, в частности, приводит к выводу, что отношение количества водорода во Вселенной к количеству гелия равно $2 : 1$. Данный вывод приблизительно подтверждается экспериментально. Имеющиеся расхождения можно объяснить трудностями оценки содержания гелия. Сторонник непрерывного рождения вещества в стационарной Вселенной Хойл (его взгляды мы не обсуждали) пишет: «Поистине удивительно, что литр солнечного вещества, если бы мы могли добыть его, мог бы опровергнуть космологию пульсирующей Вселенной» ([28], стр. 92) или, добавим мы от себя, сделать ее в высокой степени вероятной. Впрочем, анализ различных космологических моделей не имеет непосредственного отношения к предмету нашего исследования. Мы остановились довольно подробно на нем лишь для того, чтобы подчеркнуть важную мысль о том, что вопрос о полном согласовании законов поведения макроскопических тел с законами движения микрочастиц, вероятно, связан в конечном счете с проблемой эволюции Вселенной. Лишь рассматривая эволюцию Вселенной, можно в принципе понять причины возрастания энтропии в окружающем нас мире и согласовать обратимость микропроцессов с видимой направленностью макроскопических явлений. Кроме того, следует еще раз подчеркнуть, что в настоящее время все модели Вселенной остаются в высшей степени гипотетическими.

При таком широком подходе попытка выдать соотношение между классической механикой и классической статистикой за образец соотношения динамических и статистических законов выглядит довольно наивно. Связь законов статистической физики и законов движения отдельных микрообъектов — это частный вопрос общей проблемы взаимоотношения высших и низших форм движения материи. И, как мы видели, он не решен в простейшем случае тепловой и механической форм движения.

Еще сложнее проследить соотношение между законами движения сравнительно простых форм материи, кото-

рые рассматриваются в физике, и законами, управляющими такими сложными формами материи, как биологическая. Согласно основным положениям материалистической диалектики высшие формы движения материи не сводятся к низшим. Но каким образом у сложных систем возникают свойства, которые вообще не могут иметь простые объекты, составляющие эти системы (в конечном счете элементарные частицы)?

В философском плане можно высказать уверенность в том, что простые объекты в потенциальной форме обладают свойствами, которые могут проявиться в полной мере только в упорядоченных коллективах таких объектов. Однако проследить за этим на биологических системах пока не удастся. В частности, молекулярная биология, несмотря на огромные успехи, достигнутые за последние годы, далека от понимания основных жизненных процессов на молекулярном уровне. Еще сложнее дело обстоит с мышлением.

Построение теории высших форм движения материи только на основе известных законов низших форм — вряд ли разрешимая в целом задача. Специфические закономерности высших форм движения материи в первую очередь должны исследоваться экспериментально.

Теперь займемся главным предметом нашего исследования — соотношением динамических и статистических закономерностей, описывающих одну и ту же форму движения материи.

§ 4. Соотношение динамических и статистических законов, описывающих одну и ту же форму движения материи

При анализе типичного соотношения между динамическими и статистическими закономерностями для выяснения их относительной роли в общем случае нужно в первую очередь рассматривать законы, трактующие одну и ту же форму движения материи, один и тот же круг явлений. Только таким образом можно установить определенные закономерные отношения, имеющие весьма общий характер, и прийти к правильным представлениям о сущности статистических законов и их значении. Как было показано в предыдущем параграфе, первый аспект проблемы соотношения двух типов закономерностей не только не является основным, но и вообще не имеет сколь-

ко-нибудь существенного значения по сравнению со вторым. Исследование соотношения высших и низших форм движения материи нельзя смешивать с изучением соотношения динамических и статистических законов.

Основной тезис, который мы будем стремиться обосновать, заключается в следующем: *динамические законы представляют собой первый, низший этап в процессе познания окружающего нас мира; статистические законы более совершенно отображают объективные связи в природе: они являются следующим, более высоким этапом познания.*

Наш основной тезис непосредственно вытекает из рассмотрения исторических фактов развития физики, начиная от появления механики Ньютона и до возникновения квантовой теории. На протяжении всего этого периода развития физики мы видим, как первоначально возникающие динамические теории, охватывающие определенный круг явлений, определенную форму движения материи, сменяются по мере развития науки статистическими теориями, трактующими тот же круг вопросов с новой, более глубокой точки зрения.

Схематически этот процесс можно изобразить следующим образом:

Классическая механика	→ Квантовая механика
Термодинамика	→ Статистическая термодинамика
Механика сплошных сред	→ Статистическая теория деформируемых сред
Классическая макроскопическая электродинамика (теория Максвелла)	→ Микроскопическая электродинамика (электронная теория)
Классическая теория элементарных электромагнитных процессов, базирующаяся на микроскопических уравнениях Максвелла — Лоренца	→ Квантовая электродинамика

К этой схеме можно еще добавить соотношение:

Релятивистская механика	→ Релятивистская квантовая механика
-------------------------	-------------------------------------

Рассматривать последнее соотношение отдельно не имеет особого смысла, поскольку классическая релятивистская механика (уравнение движения Минковского) точно так же относится к релятивистской квантовой

механике, как механика Ньютона к нерелятивистской квантовой механике.

Приведенные в нашей схеме теории в основном исчерпывают содержание современной теоретической физики. Из нее только выпадают теория гравитационного поля и теории слабых и сильных взаимодействий. Выпадают они по совершенно различным причинам, *не ставящим под сомнение справедливость основного тезиса*, защищаемого в настоящей работе.

Динамический характер теории тяготения можно всецело отнести за счет того, что она является макроскопической теорией, т. е. теорией взаимодействия тел, состоящих из громадного числа частиц. Теория тяготения Эйнштейна — гравитационный аналог электродинамики Максвелла. Но, в отличие от электромагнитных сил, гравитационные силы ультраслабы, и поэтому гравитационными силами взаимодействия отдельных элементарных частиц можно полностью пренебречь. Соответственно микроскопическая статистическая теория гравитации, в отличие от микроскопической электродинамики, просто не нужна. Не имеет смысла интересоваться, к примеру, флуктуациями гравитационного поля совокупности элементарных частиц, если средние значения таких полей пренебрежимо малы.

Лишь при взаимодействии тел космических масштабов гравитационные силы оказываются существенными. Звезды в галактиках можно рассматривать как гравитирующий газ, находящийся в неравновесном состоянии, и применять к нему известные законы статистической физики неравновесных процессов.

Квантовая теория гравитационного поля, разумеется, должна быть статистической. Но задача построения квантовой теории сильного гравитационного поля, описываемого нелинейными уравнениями, в настоящее время не решена. В линейном приближении слабое гравитационное поле проквантовано. Об этом говорилось в § 1 данной главы. В современной физике элементарных частиц гравитацией просто пренебрегают. Согласно существующим представлениям, квантовые свойства гравитационного поля должны проявляться лишь на расстояниях порядка 10^{-33} см, недоступных современному эксперименту (достижимые расстояния порядка 10^{-15} см).

Теория слабых и сильных взаимодействий не имеет классической области применимости, как уже отмеча-

лось ранее, и поэтому она может быть только квантовой, т. е. статистической. Факт этот весьма показателен. Не известна ни одна группа явлений, которую нельзя было бы описывать статистическими законами. Но для целого класса явлений какие-либо динамические законы даже в самом грубом приближении непригодны.

Таким образом, наше утверждение о последовательной смене динамических теорий более глубокими статистическими имеет совершенно общий характер. Следует еще специально уточнить, что мы подразумеваем, говоря о смене динамических теорий статистическими. Это, конечно, ни в коей мере не означает, что «старые» динамические теории отживают свой век и сдаются в архив. Практическая их ценность несколько не умаляется фактом создания новых теорий, а во многих случаях (термодинамика, электродинамика Максвелла), напротив, приобретает еще большее значение. Говоря о смене теорий, мы имеем в виду в первую очередь смену физических представлений о сущности явлений, описание которых дается соответствующими теориями. Одновременно со сменой физических представлений расширяется область применимости теории. Она распространяется на более широкий круг явлений, недоступный для динамической теории, возникшей на первом этапе познания.

Новые теории находятся в лучшем количественном согласии с экспериментом, чем старые, причем новая статистическая теория содержит в себе как частный случай, справедливый при некоторых условиях, соответствующую динамическую теорию. В согласии с историческим ходом развития физики проследим это несколько подробнее прежде всего на соотношении термодинамики и статистической физики. Разумеется, кратко, так как историческая последовательность возникновения физических теорий и их содержание изложены в гл. II.

Поскольку содержание термодинамики представляет собой совокупность следствий из ее основных феноменологических законов, являющихся непосредственным обобщением опытных фактов, и поскольку сами эти законы вытекают из статистической физики, можно сказать, что статистическая физика включает в себя всю термодинамику в качестве частного случая. Частного в том смысле, что положения термодинамики справедливы только тогда, когда отклонения от средних значений различных

величин — флуктуации — пренебрежимо малы *). Иными словами, они справедливы не для всех систем, не для всех явлений. Флуктуациями нельзя пренебречь при малом размере системы, так как тогда они велики, или же в том случае, когда размеры системы не малы, но для рассматриваемого явления имеют существенное значение малые флуктуации. Примером значительных флуктуаций в малых объемах могут служить флуктуации давления в областях порядка размера броуновской частицы, которые и вызывают ее движение.

В отдельных случаях значительные флуктуации наблюдаются и в больших объемах. Так, если теплоемкость системы велика (стремится к бесконечности), то энергия практически не зависит от температуры и флуктуации приобретают макроскопический характер. Именно такой случай наблюдается при равновесии между паром и жидкостью. Так, процесс кипения носит хаотический характер, что легко обнаружить, заглянув в кипящий чайник.

Статистическая физика позволила вскрыть молекулярную сущность тепловых процессов и выяснить истинную причину необратимости явлений в природе. Была дана интерпретация второго начала термодинамики.

Кроме учета флуктуаций, статистическая физика несравненно «богаче» термодинамики в том отношении, что позволяет определить значения термодинамических функций теоретически на основе знания молекулярных свойств системы.

Соотношение между термодинамикой и статистической физикой отлично от того, которое получило наименование принципа соответствия и имеет место между классической и квантовой механикой или между классической и релятивистской механикой. Для принципа соответствия характерно, что старая теория, содержащаяся в новой как предельный случай, продолжает иметь в пределах своей применимости точно такое же значение, которое она имела до создания новой теории. Выясняются только границы применимости теории, и становится ясным, в

*) Отметим, что, вообще говоря, законы термодинамики хотя и следуют из классической статистики, но обладают большей общностью, чем последняя. В самом деле, законы термодинамики справедливы и для систем, состоящих из совокупности объектов с ярко выраженными квантовыми свойствами, движение которых нельзя описать в рамках механики Ньютона.

каких случаях пользоваться ею нет смысла. В рассматриваемом случае положение несколько иное. Статистическая физика в части своей, касающейся тепловых свойств тел, трактует те же явления, что и термодинамика. Однако она не только дает то же, что и термодинамика (плюс флуктуации), но и вкладывает новое содержание в законы термодинамики и позволяет вычислять термодинамические функции, с которыми термодинамика имела дело задолго до появления статистической физики. Это приводит к тому, что роль термодинамики не только не уменьшается с появлением статистической физики, но, напротив, возрастает, причем дальнейшее ее развитие происходит в тесном контакте с последней. Дело в том, что все формальные соотношения, получаемые специфическим термодинамическим методом, сохраняют все свое значение и в статистической физике. Поэтому термодинамический метод получения следствий из начал термодинамики и статистический метод нимало не противоречат друг другу, а, напротив, дополняют друг друга, образуя единое целое. Современная теория тепловых процессов в макроскопических телах так и называется: статистическая термодинамика. Следствия из начал термодинамики выводятся и будут выводиться термодинамическими методами, а термодинамические функции рассчитываются статистическими методами. Не следует только забывать, что сами начала термодинамики вытекают из статистической теории и только она вскрывает истинное физическое содержание начал.

Таким образом, связь между термодинамикой и статистикой гораздо теснее связи, характеризуемой принципом соответствия. Статистическая физика (как классическая, так и квантовая), заключая в себе законы термодинамики и указывая границы их применимости, одновременно чрезвычайно углубляет содержание этих законов и дает возможность с их помощью производить расчеты тепловых процессов до конца, до чисел.

Итак, в отношении термодинамики и статистической физики наш тезис целиком оправдывается. Статистическая физика является новым, более глубоким этапом изучения тепловых свойств вещества.

Соотношение между механикой сплошных сред (которая, по существу, не является чистой механикой, поскольку в ней учитывается теплопередача и другие тепловые процессы) и статистической теорией неравно-

весных процессов, или физической кинетикой, в принципе такое же, как и между термодинамикой и статистической механикой. Поэтому подробно на данном вопросе можно не останавливаться. Следует только подчеркнуть, что статистическая теория неравновесных процессов развита гораздо слабее, чем равновесных. Основные принципы теории этих процессов разработаны с достаточной полнотой, но успешное развитие методов решения различных задач началось сравнительно недавно.

Обычные макроскопические уравнения движения сплошной среды (например, уравнения гидродинамики) можно вывести из кинетических уравнений для одночастичной функции распределения $f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$. Равным образом можно записать и уравнения баланса энергии. Кинетические уравнения для одночастичной функции распределения в свою очередь получаются путем обрыва цепочки уравнений Боголюбова для функций распределения различного порядка:

$$f_{12}(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1; \mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2, t), f_{123}(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1; \mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2; \mathbf{r}_3, \mathbf{p}_3, t)$$

и т. д. Вся цепочка эквивалентна точному уравнению Лиувилля для функции распределения всех N частиц системы

$$f(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1; \dots; \mathbf{r}_N, \mathbf{p}_N, t).$$

Существенно, что различного рода кинетические коэффициенты — коэффициенты вязкости, трения, диффузии и т. д., — необходимые для описания процессов, можно в принципе найти, пользуясь только статистической теорией. В макроскопической (феноменологической) теории они должны определяться экспериментально. Правда, практически статистическими методами удастся в большинстве случаев оценить лишь порядок этих величин, их свойства симметрии и зависимости от разного рода параметров (например, температуры).

Во многих случаях применяемое в механике сплошных сред описание процессов с помощью различного рода функций координат и времени — плотности $\rho(\mathbf{r}, t)$, скорости $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$, давления $p(\mathbf{r}, t)$ и температуры $T(\mathbf{r}, t)$ — оказывается недостаточным. Так, например, полное описание процессов в плазме возможно только при использовании кинетических уравнений для функции распре-

деления. Гидродинамическое описание применимо без особых оговорок лишь для достаточно плотной плазмы, когда длина пробега частиц значительно меньше размера системы и столкновения частиц играют определяющую роль.

Наконец, нельзя не отметить, что при движении жидкостей и газов с достаточно большими скоростями в большинстве случаев, встречающихся на практике, регулярное (ламинарное) течение становится неустойчивым. Возникает так называемое турбулентное течение, при котором различные характеристики среды — плотность, давление, скорость, температура — испытывают значительные флуктуации, быстро и нерегулярно изменяясь от точки к точке. Описание турбулентного течения возможно только в рамках статистической теории, «... опирающейся на изучение специфических статистических закономерностей, присущих большим совокупностям однотипных объектов. Таким образом, теорией турбулентности может быть лишь статистическая гидромеханика, изучающая статистические свойства ансамблей течений жидкостей или газов, находящихся в макроскопически одинаковых внешних условиях» [30]. При этом надо иметь в виду, что в теории турбулентности не рассматривается движение жидкостей и газов на молекулярном уровне. Как и вообще в гидромеханике, здесь речь идет о движении непрерывной среды, кинетическая энергия которой переходит в тепло под действием сил вязкости. Турбулентное движение описывается теми же уравнениями гидродинамики, что и ламинарное.

Как и в случае равновесных процессов, появление статистической теории неравновесных процессов нисколько не умаляет ценности соответствующих динамических законов механики сплошных сред. Сами уравнения механики сплошных сред не меняют своей формы. Но статистическая теория позволяет в принципе рассчитать входящие в эти уравнения кинетические коэффициенты. Кроме того, статистическая теория неравновесных процессов указывает границы применимости динамических уравнений механики сплошных сред. Она справедлива и тогда, когда обычное гидродинамическое описание системы большого числа взаимодействующих частиц непригодно.

Наш основной тезис в данном случае целиком оправдывается.

Перейдем теперь к закономерностям электромагнитных явлений. Несомненно, что микроскопическая электродинамика содержит уравнения Максвелла как частный случай; это надо понимать в том смысле, что усреднение уравнений микроскопической электродинамики (уравнений Максвелла — Лоренца) дает систему уравнений Максвелла. Столь же несомненно, что микроскопическая теория гораздо «богаче» по своему содержанию теории Максвелла. Можно теоретическим путем на основе представлений о строении вещества найти электромагнитные свойства вещества — диэлектрическую и магнитную проницаемости и удельную проводимость, — тогда как в теории Максвелла они определяются из эксперимента. В соответствии с опытом эти величины уже не считаются постоянными. Теория позволяет определить их зависимость от давления, температуры, частоты переменных полей, напряженностей электрического и магнитного полей.

Кроме того, микроскопическая электродинамика в состоянии описывать электромагнитные явления, в которых существенную роль играют флуктуации (очевидно, что хотя флуктуации имеются всегда, но не для всех явлений они существенны).

Однако все это ни в коей мере не означает, что роль теории Максвелла уменьшилась с появлением электронной теории. Совсем наоборот. По существу, описание электромагнитных явлений, даваемое теорией Максвелла, остается в силе и только дополняется методом, позволяющим рассчитывать входящие в нее «константы». Уравнения Максвелла изменяются и при рассмотрении флуктуаций, но тогда входящие в них величины приобретают более глубокий смысл. Например, для вычисления интенсивности света, рассеянного средой, достаточно рассчитать флуктуации диэлектрической проницаемости ϵ , а затем найти искомую интенсивность.

Для вакуума уравнения Максвелла и исходные уравнения электронной теории — уравнения Максвелла — Лоренца — просто совпадают.

Соотношение между обеими теориями подобно соотношению между термодинамикой и статистической механикой. Там мы имели дело с феноменологической и молекулярно-кинетическими теориями тепла. Здесь мы имеем дело с феноменологической теорией электромагнитного поля (теория Максвелла) и электронной теорией. Обе

теории не исключают, а дополняют друг друга, но наиболее глубокая трактовка электромагнитных процессов дается микроскопической электродинамикой. Наш тезис и в случае теории электромагнитного поля получает прямое подтверждение.

Чтобы закончить вопрос об электромагнитном поле, остановимся сразу же, отступая от исторической последовательности смен закономерностей, на дальнейшем развитии теории, знаменующем еще более глубокое проникновение статистических законов в теорию. Об этом ранее было сказано достаточно подробно, так что теперь можно ограничиться несколькими фразами.

Классическая микроскопическая электродинамика оказалась неспособной объяснить процессы излучения и поглощения коротких электромагнитных волн. Изучение этих вопросов привело в конечном счете к появлению квантовой теории, причем оказалось необходимым пересмотреть как законы движения отдельных частиц, так и законы электромагнитных процессов. Лишь основные принципы построения статистической механики остались в основном незатронутыми.

Вместо динамических уравнений Максвелла — Лоренца, описывающих элементарные электромагнитные процессы, появились уравнения квантовой электродинамики, описывающей те же процессы, но с новой, более глубокой точки зрения. Для нас существенно, что эти новые уравнения носят статистический характер, а старые динамические уравнения оказались первым приближением к действительности.

Соотношение между классическими и квантовыми уравнениями для поля дается принципом соответствия: новая теория переходит в старую при большом числе фотонов. В этом случае с достаточной точностью выполняются динамические законы, т. е. усредненные уравнения, справедливые для большого числа частиц.

Остановимся, наконец, на соотношении между классической механикой Ньютона и квантовой механикой. Подробно мы рассмотрим этот вопрос позднее, в гл. IV, на основе фейнмановского представления квантовой механики. Пока ограничимся лишь замечанием, что соотношение между классической и квантовой механикой удовлетворяет принципу соответствия (подробнее см. [31]). При $\hbar \rightarrow 0$ уравнение Шредингера переходит в уравнение Гамильтона — Якоби, являющееся одной из

возможных формулировок классической механики. Можно и непосредственно перейти к уравнению Ньютона. Динамические уравнения Ньютона приближенно справедливы при больших кинетических энергиях частиц, движущихся в медленно меняющихся полях, когда изменением поля на расстояниях порядка длины волны де Бройля $\lambda = 2\pi\hbar/p$ (p — импульс частицы) можно пренебречь.

Главное значение квантовой теории с интересующей нас точки зрения заключается в том, что после ее появления в теории любых процессов «последнее слово» остается за статистическими закономерностями. Теперь уже нельзя ссылаться на то, что в основе известных статистических законов лежат пока неизвестные динамические законы.

Именно это в первую очередь подрывает доверие к утверждению о том, что динамические законы являются первичными, и выдвигает статистические закономерности на первый план.

Здесь мы сталкиваемся с весьма характерной ситуацией. Новое фундаментальное открытие меняет очень общие представления, сложившиеся на основе всего предшествующего развития науки. В такой ситуации можно поступать двояко. Можно попытаться любой ценой доказать, что новая теория, описывающая это открытие, совсем не находится в непримиримом противоречии с фундаментальными положениями, лежащими в основе классической науки, и является лишь новым, необычным по форме этапом ее развития. В дальнейшем будет с очевидностью показано, что общие представления, давно уже выработанные в макрофизике, должны оставаться правильными и в новой области, в микромире.

Вместе с тем можно пересмотреть всю постановку проблемы, располагая новыми, более глубокими знаниями законов природы.

Нам представляется весьма неблагоприятным делом отстаивать первую точку зрения. Появление квантовой механики привело к коренному преобразованию очень большого числа конкретных физических представлений. Нет оснований допускать, что это не затрагивает и общие физические положения.

Главным же здесь представляется то обстоятельство, что с точки зрения, непосредственно диктуемой статистической сущностью квантовомеханических законов, происхождение и смысл старых представлений вполне яс-

ны. Понятны причины, обусловившие определенные воззрения на соотношение динамических и статистических законов. На основе возникших в первую очередь «грубых» динамических теорий типа механики Ньютона выработались соответствующие «грубые» критерии смысла и значения закономерностей. Хотя сами динамические законы и имеют свою сферу применимости, вытекающие из них обобщения методологического характера оказываются просто неверными. Дело в том, что эти обобщения базируются на абсолютной значимости динамических законов, которой в действительности нет.

Соответственно объяснить ведущую роль статистических законов в микромире, исходя из примата динамических законов, вряд ли возможно, хотя такие попытки предпринимались Никольским, Бомом и др.

Обычно видят проблему в том, чтобы понять причины статистического характера той или иной теории. Открытие статистических законов, управляющих индивидуальными процессами в микромире, наводит на мысль, что это вряд ли правильно. С не меньшим, а скорее с большим основанием нужно ставить вопрос: в чем причина динамического характера законов классической механики и других динамических теорий? Если заранее, до детального исследования проблемы, не склоняться к предположению о первичной роли динамических закономерностей, то такую постановку вопроса ни в коей мере нельзя считать надуманной. В следующей главе об этом будет сказано подробнее.

Правильный подход к проблеме состоит в выяснении тех условий, при которых можно приближенно описывать процессы динамическими законами, и тех, при которых делать этого нельзя. Иными словами, необходимо установить, в каких случаях важна статистическая природа изучаемых явлений.

То обстоятельство, что с развитием науки статистические закономерности приобретают все большее и большее значение и в настоящее время представляют собой самые глубокие из известных нам законов, что они являются первичными, разумеется, отмечалось многими учеными, физиками в первую очередь.

Во введении уже приводилось высказывание Фока о статистических законах как наиболее общих законах природы. Можно привести в качестве примера ряд высказываний других ученых.

Выдающийся физик-материалист Ланжевен говорит следующее: «Точного знания наблюдаемой величины в данный момент времени вообще недостаточно, чтобы предвидеть с достоверностью значение, которое она примет в следующий момент.

Неопределенность, возникающая и непрерывно растущая с течением времени взамен достоверности, есть общий и фундаментальный факт в волновой механике и в статистическом детерминизме, и она пронизывает всю физику. Но и во всем человеческом опыте наблюдается, что приобретенная в данный момент достоверность допускает только предположения относительно последующих событий, поскольку расплывание вероятностей увеличивается со временем, если только последующая информация, эквивалентная установке второго экрана с отверстием на пути фотона, не восстановит наши возможности точного предвидения и не модифицирует волновую функцию с учетом новой информации» [5].

Рассел подчеркивал, что физика XX века «заменила статистическими средними значениями строго детерминистическую причинность, обуславливающую каждое индивидуальное событие» [32].

«Статистические методы в физике по мере развития науки,— подчеркивает Борн,— распространялись все больше и больше, и сегодня можно сказать, что современная физика полностью опирается на статистическую основу. Этот факт связан с победой атомистики. Тела состоят из молекул и атомов, последние — из ядер и электронов, а ядра — из протонов и нейтронов. Бесконечное число частиц делает невозможным никакое детерминистическое описание и вынуждает нас принять статистические методы.

Раньше эти методы были довольно слабо связаны с построением механических и электродинамических теорий. Сегодня квантовая теория привела нас к более глубокому пониманию: она установила более тесную связь между статистикой и основами физики.

Это является событием в истории человеческого мышления, значение которого выходит за пределы самой науки» [33].

Подобного рода высказывания об основополагающей роли статистических законов можно найти у Блохинцева [34], Мизеса [35], Бриллюэна [36] и многих других.

Таким образом, наше утверждение о том, что статистические законы отражают более высокий этап познания, чем динамические, конечно, нельзя считать чем-то совершенно новым. Мы только стараемся проследить в деталях за всеми фактами, которые показывают неизбежность данного вывода. Необходимость в этом, видимо, имеется. Простой констатации факта распространения статистических теорий на новые области недостаточно для обоснования основополагающей роли статистических законов. Правильные сами по себе высказывания типа: «Необоснованным является утверждение о том, что вероятностный способ описания природы в каком-то смысле хуже, чем старый, детерминистский, дававший однозначные предсказания о поведении объекта. Серьезных философских доводов в пользу этого утверждения привести нельзя» [37] — не могут поколебать веру в преимущественное значение динамических закономерностей у сторонников этой точки зрения.

Как ни странно, значительная часть не только философов, но и физиков продолжает игнорировать достаточно очевидный в наше время факт: наиболее глубокое описание любого процесса дается статистической теорией, а соответствующая динамическая теория (если она вообще возможна) является более грубым приближением к истине. По-прежнему часто отстаивается точка зрения о первичности динамических законов или о равноправии их со статистическими.

Однако нельзя сказать, что какие-то факты остаются неизвестными. Картина оказывается более странной: факты игнорируются в пользу предвзятых точек зрения. Это, например, можно видеть из обсуждения в литературе нашей работы [9] «Соотношение между динамическими и статистическими закономерностями и квантовая механика», опубликованной в журнале «Вопросы философии» в 1958 г. В ней кратко излагались факты, представленные выше в более развернутом виде, и был сформулирован тезис о том, что статистические законы являются высшим этапом познания. Приблизительно те же идеи развивались в работе [38].

Наряду с положительными отзывами [39, 40] о защищаемых в этих работах идеях, появились и резко отрицательные. Характерно, что авторы, не согласные с доминирующей ролью статистических законов, совершенно не пытаются отрицать фактическую сторону дела, а именно

последовательную смену динамических закономерностей статистическими по мере развития физики. Об этом просто не говорится ни слова, как если бы представленные аргументы не имели не только решающего, но и вообще никакого значения. Вместо возражений против доказательной силы анализа существующего в физике соотношения закономерностей излагается собственный взгляд на проблему, вытекающий, как представляется авторам, из неких очевидных для них общих положений. Свои взгляды авторы не подкрепляют конкретным исследованием полной картины соотношения динамических и статистических законов в физике.

Так, в статье [10] на основе определения динамических и статистических законов, приведенного нами ранее во введении, приходят к заключению, что они «не сводятся друг к другу в том же смысле, как не сводятся друг к другу различные формы движения материи». С этим трудно согласиться, так как термодинамика и статистическая термодинамика описывают одну и ту же тепловую форму движения материи, электродинамика Максвелла и микроскопическая электродинамика также одну — электромагнитную и т. д.

То, что динамические законы представляют собой первый, низший этап в процессе познания мира, а статистические — более совершенный, высший, представляется Руткевичу, Шварцу и Осипову [41] неверным. Так, авторы пишут: «В объективной действительности есть связи разного рода. Существенные связи единичных объектов суть динамические закономерности; существенные связи очень большого числа сравнительно однородных объектов — статистические закономерности. И те и другие зависят от природы объектов и потому взаимно связаны; этот факт находит свое выражение в существовании различных статистик (Максвелла — Больцмана, Ферми — Дирака, Бозе — Эйнштейна) для частиц разного рода, отличных по своим динамическим закономерностям». Как видно из этого высказывания, авторы решают проблему по-своему с помощью придуманной ими терминологии. Наличие у объекта определенного свойства (например, целого или полуцелого спина у частицы) есть, по мнению авторов, некоторый динамический закон. Благодаря этому приему любой статистический закон (да и динамический в том смысле, как его принято понимать) оказывается состоящим из массы динамических законов

в смысле авторов. Например, проекции спинов частиц надо отнести к «существенным связям единичных объектов». Но эти проекции могут принимать те или иные значения в соответствии со статистическими квантовомеханическими законами. Получается, что возможные значения проекции даются динамическим законом, а возможные реализации того или иного значения — статистическим законом.

Таким образом, критика основополагающего значения статистических законов не представляется сколько-нибудь убедительной. Но вопрос о том, почему же в большом числе работ игнорируются факты очевидного превосходства статистических законов, безусловно заслуживает внимания. Мы вернемся к нему в дальнейшем.

Можно с полной определенностью утверждать, что в современной физике статистические теории являются высшим этапом познания по сравнению с динамическими. Однако этот факт еще не может служить неоспоримым доказательством того, что данное соотношение между закономерностями отражает общую, а не переходную ситуацию, характерную только для современного состояния нашего знания. Для доказательства нашего основного тезиса нужно дать ему философское обоснование.

Основные идеи этого обоснования приведены в статье [9] и кратко повторяются в работе Баженова [42]. О причинах главенствующей роли статистических законов упоминается и в интересной статье Вонсовского и Курсанова [8]. «Первичный характер статистических закономерностей,— говорят авторы,— связан с наличием множественности причин, обуславливающих противоречивый характер связей различных факторов в движении микрообъектов». С развитием науки статистический характер законов остается незыблемым, так как по мере углубления наших знаний будет обнаруживаться еще большее богатство объективных связей.

В дальнейшем мы подробно рассмотрим возможности более глубокого философского обоснования основного тезиса о первичном характере статистических законов. Сначала же попытаемся детальнее выяснить вопрос о том, какие явления совершенно удовлетворительно трактуются динамическими законами и в каких случаях необходимо учитывать статистический характер рассматриваемых явлений.

Г Л А В А IV

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ И ГРАНИЦЫ ИХ ПРИМЕНИМОСТИ

§ 1. Принцип наименьшего действия как принцип максимальной вероятности

Исследуя значение, смысл и границы применимости динамических законов, мы в первую очередь будем иметь в виду законы классической механики. С одной стороны, здесь ситуация наиболее прозрачна, а с другой — все основные вопросы, связанные с границами применимости динамических законов для систем с малым числом объектов, можно выяснить на примере механики Ньютона. Придется лишь особо исследовать пригодность динамических законов для описания систем с очень большим числом частиц. Этому посвящен § 3 данной главы.

Мы не будем останавливаться на взаимоотношении механики Ньютона и релятивистской механики Минковского. Обе эти теории относятся к динамическим. Движение же микрочастиц подчиняется статистическим законам квантовой механики, и поэтому следует более детально, чем в предыдущих главах, рассмотреть границы применимости механики Ньютона и с этой стороны.

Не будет большим преувеличением сказать, что полная ясность в вопросе об отношении классической механики к квантовой появилась после формулировки Фейнманом в 1948 г. нового представления квантовой механики с использованием интегралов по траекториям [43]. Именно в изложении Фейнмана квантовая механика предстает как непосредственное обобщение классической механики. Одновременно становится совершенно понятным, почему статистические по своей природе законы движения тел при больших массах (область при-

менимости классической механики) принимают с большой точностью динамический характер. Тем самым устраняется имеющаяся на первый взгляд пропасть между физическим содержанием основных принципов классической и квантовой механик.

Фейнман показал, что соотношение между классической механикой и квантовой становится наиболее ясным, если перекинуть мост от квантовых принципов непосредственно к классическому принципу наименьшего действия в форме Гамильтона.

Принцип наименьшего действия представляет собой наиболее экономную формулировку законов механики. Хотя его и можно получить с помощью других формулировок механики (в частности, ньютоновской), но фактически до работ Фейнмана глубокая внутренняя природа этого принципа оставалась скрытой. Поэтому не удивительно, что в свое время делались многочисленные попытки телеологического истолкования принципа наименьшего действия как выражения бесконечной мудрости «творца» и целесообразности устройства Вселенной на основе максимальной экономии действия. Автор первой формулировки этого принципа Мопертюи настаивал на его телеологической основе. С ним был согласен Эйлер. В возникшей дискуссии участвовал Даламбер и даже Вольтер [44]. Постепенно ученые полностью отошли от телеологического взгляда на природу принципа Мопертюи. В частности, существенную роль здесь сыграло то, что на самом деле действие должно быть не минимальным, а экстремальным, т. е. может быть и максимальным. Но с чем связано то обстоятельство, что общий или даже наиболее общий закон природы утверждает экстремальный характер действия для реальных траекторий движения тел, оставалось неясным.

Первая догадка была высказана Эддингтоном [45] еще при зарождении квантовой теории, до создания последовательной квантовой механики. Известен был лишь сам факт существования кванта действия — постоянной Планка \hbar .

Если разделить действие системы S на квант действия \hbar , то получится безразмерное число, которое, как и само действие, будет играть в теории важнейшую роль благодаря наличию принципа наименьшего действия. Какая другая безразмерная величина играет столь же фундаментальную роль в физике? Очевидно, вероятность.

Тогда, согласно Эддингтону, можно предположить, что принцип наименьшего действия должен быть тождествен принцип у максимальной вероятности. Фейнману удалось это доказать.

В основе нового, фейнмановского, представления квантовой механики лежит единственный постулат, позволяющий определять вероятность перехода частицы из одной точки пространства в другую [46]. Пусть частица в момент времени t_a находится в точке a . Спрашивается, какова вероятность $P(b, a)$ того, что в момент t_b она попадет в точку b ? Для ответа на этот вопрос нужно рассмотреть *все возможные траектории*, ведущие из a в b , причем *каждая траектория* вносит свой вклад в искомую вероятность. Согласно основному постулату Фейнмана вклады отдельных траекторий равны по величине и отличаются только фазами. Фаза вклада от какой-либо заданной траектории равна классическому действию S для данной траектории, выраженному в единицах действия \hbar . Количественно это формулируется следующим образом. Амплитуда вероятности данной траектории равна

$$\varphi[\mathbf{r}(t)] = \text{const} \cdot \exp \left\{ \frac{iS[\mathbf{r}(t)]}{\hbar} \right\},$$

где S — классическое действие для данной траектории $\mathbf{r}(t)$.

Амплитуда полной вероятности равна сумме по всем траекториям, т. е.

$$A(b, a) = \sum_i \varphi_i[\mathbf{r}(t)],$$

а вероятность —

$$P(b, a) = |A(b, a)|^2,$$

т. е. квадрату модуля амплитуды. Условие нормировки определяет константу в выражении для $\varphi[\mathbf{r}(t)]$.

Из данного постулата, как показал Фейнман, вытекает вся обычная квантовая механика и, в частности, уравнение Шредингера. Таким образом, наряду с матричным представлением квантовой механики Гейзенберга и волновым Шредингера, Фейнман нашел новое представление квантовой механики, полностью идентичное известным ранее.

Формулировка квантовой механики с помощью интегралов по траекториям позволяет очень просто переф-

ти к приближению классической механики, когда две точки в заданном силовом поле могут быть связаны лишь единственной траекторией, вдоль которой действие экстремально.

В классическом случае действие очень велико, т. е. $S \gg \hbar$. Поэтому фаза S/\hbar для каждой траектории очень велика. По формуле Эйлера

$$\exp(iS/\hbar) = \cos(S/\hbar) + i \sin(S/\hbar),$$

причем как действительная, так и мнимая части амплитуды $\varphi[r(t)]$ могут оказаться и положительными, и отрицательными. Если слегка сдвинуть траекторию, добавив к ней малое по классическим масштабам смещение $\delta r(t)$, то изменение действия окажется большим в сравнении с \hbar . Следовательно, малые возмущения траектории ведут к большим изменениям фазы, и функции $\cos(S/\hbar)$, $\sin(S/\hbar)$ будут совершать быстрые колебания между положительными и отрицательными значениями. Если одна траектория дает положительный вклад в амплитуду вероятности, то другая, бесконечно близкая, — отрицательный вклад, и в целом вклад окажется просто равным нулю. Поэтому данную траекторию можно просто не учитывать, если соседние с ней имеют другие значения действия. Их вклады будут взаимно уничтожаться.

Однако небольшое смещение $\delta r(t)$ одной траектории $r_{\text{кл}}(t)$, для которой действие экстремально, в первом приближении не меняет действия S (это и означает наличие экстремума). Фазы всех вкладов от траекторий, находящихся в этой области, мало отличаются друг от друга; они равны $S_{\text{кл}}/\hbar$ и взаимно не уничтожаются. В классическом приближении $S \gg \hbar$ мы должны рассматривать эту траекторию как единственно возможную. Таким образом, принцип наименьшего действия в классической форме

$$\delta S = 0$$

следует из квантового принципа Фейнмана.

Если S сравнимо с \hbar , то надо учитывать все траектории. Ни одна из них не будет иметь преимущественного значения.

Итак, нам лишь кажется, что природа выбирает однозначный классический путь. На самом деле участвуют все возможные пути и справедлив статистический закон.

Классическая траектория просто наиболее вероятна; она осуществляется в качестве единственной только при условии $S \gg \hbar$. Фундаментальный динамический принцип — принцип наименьшего действия — имеет, по существу, статистическую природу.

Сказанное относится не только к механике. Так, динамические законы геометрической оптики (например, в форме вариационного принципа Ферма) устанавливают единственную траекторию светового луча, соединяющую две любые точки пространства. Но эта единственная траектория в действительности оказывается лишь наиболее вероятной из бесчисленного множества других возможных траекторий. Говорить о единственно возможной траектории можно лишь в том случае, когда длина волны много меньше пространственных размеров неоднородностей среды, в которой распространяется свет.

После обнаружения статистической природы фундаментального принципа классической механики, очевидно, лишены смысла попытки отстаивать представление о первичности динамических законов, образцом которых как раз и является механика Ньютона.

§ 2. Классическая механика как статистическая теория

До сих пор, говоря о динамических закономерностях, в частности о закономерностях классической механики, мы не останавливались на одном очень существенном обстоятельстве. Даже в сфере своей применимости те абсолютно точные, однозначные связи, которые фиксируются существующими динамическими законами, являются точными только для метафизически мыслящего ума, но не в природе. Имеется еще одна граница применимости законов классической механики, не связанная ни с теорией относительности, ни с квантовой механикой.

Приведем вначале высказывание Бриллюэна, хорошо показывающее суть дела ([36], стр. 150): «Законы классической механики представляют собой математическую идеализацию, которую нельзя считать соответствующей реальным законам природы... Классическая точка зрения пренебрегала действительной ролью экспериментальной погрешности. Ошибки считались случайностью. Отсюда всегда представлялось, что их можно сделать сколь угодно малыми и в конце концов ими можно было

пренебречь. Эта упрощенная картина привела к предположению о полном детерминизме в классической механике*). Мы сейчас должны ясно представлять себе, что экспериментальные ошибки неизбежны, обнаружение чего делает строгий детерминизм невозможным. Ошибки — существенная черта картины мира, подлежащая учету в теории.

Детерминизм необходимо заменить статистическими вероятностями».

Данный вопрос привлекает к себе особое внимание именно в связи с дискуссией о соотношении и роли динамических и статистических закономерностей. Сторонники примата статистических закономерностей обращают пристальное внимание на сам по себе не новый факт: задачи классической механики — цитадели динамических закономерностей (или детерминизма) — в действительности являются статистическими и иными не могут быть. Особенно тщательно проанализировал этот вопрос Бор в своих интересных работах «Возможно ли предсказание в классической механике?» [47], «Действительно ли классическая механика детерминистична?» ([33], стр. 385) — «Замечания о статистической интерпретации квантовой механики» ([33], стр. 440). Тому же вопросу посвящена львиная доля цитированной выше книги Бриллюэна [36]. В одной из своих сравнительно недавних работ Блохинцев существенным образом дополнил исследования Борна ([34], стр. 5—21). Ценный анализ статистичности задач классической механики с позиций марксистской диалектики проделан Суворовым в послесловии к книге Борна ([33], стр. 516—521).

Как известно, нельзя с абсолютной точностью задать начальные условия. Но дело не только в этом. В процессе движения системы на нее всегда действуют некоторые случайные силы, и их невозможно ни предсказать, ни подробно исследовать экспериментально. Даже когда эти силы малы, их влияние может оказаться значительным, если время действия велико. Наконец, нет гарантии, что в тот промежуток времени, в течение которого мы интересуемся движением системы, последняя все

*) Ввиду неоднозначности термина «детерминизм» подчеркиваем, что мы в данном контексте будем понимать под полным детерминизмом подчинение мира динамическим законам, а не наличие объективных закономерностей вообще. И только в таком смысле приведенное высказывание Бриллюэна можно считать верным.

время остается изолированной. Должны быть заданы (опять же с конечной точностью) граничные условия на поверхности области, внутри которой находится система. На роль этих обстоятельств, игнорировавшихся Борном, указывает Суворов. Детально они были проанализированы Блохинцевым.

Говорить об однозначных связях, даваемых динамическими уравнениями классической механики (то же, впрочем, относится и к микроскопическим уравнениям теории электромагнитного поля), можно, лишь закрывая глаза на перечисленные выше обстоятельства. Но они являются принципиальными.

Для простоты мы в дальнейшем будем фиксировать внимание только на неопределенности начальных условий, не касаясь роли других обстоятельств.

Итак, с самого начала нужно учитывать, что могут реализоваться не точные значения начальных координат и импульсов, а некая конечная область состояний $\Delta_0 = \Delta q_0 \Delta p_0$, внутри которой лежат начальные координаты q_0 и начальные импульсы p_0 системы, причем внутри этой области они распределены по какому-то вероятностному закону. В качестве такого закона естественно выбрать гауссово распределение, характеризуемое средними значениями координат и импульсов, а также дисперсиями этих величин (средними квадратичными отклонениями), определяющими размер области Δ_0 .

Здесь наибольшее значение имеет то обстоятельство, что движение тел в классической механике не стабильно по отношению к начальным условиям. Оно было бы стабильным, если бы область состояний системы $\Delta = \Delta q \Delta p$ в любой момент времени имела конечные размеры. Лишь в этом случае можно было бы описывать движение системы с заданной определенной точностью на неограниченных отрезках времени.

Однако на самом деле положение совершенно иное, что легко показать на многочисленных примерах. Так, если рассматривать вращение без трения твердого тела с моментом инерции J вокруг неподвижной оси, то угол поворота φ в любой момент времени t будет определяться уравнением

$$\varphi = \varphi_0 + M_0 t / J,$$

где M_0 — начальный момент импульса тела. Так как начальный угол φ_0 можно определить лишь с конечной точ-

ностью $\Delta\varphi_0$, а начальный момент импульса — с конечной точностью ΔM_0 , то неопределенность в значении φ будет возрастать линейно со временем по закону

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + \Delta M_0 t / J.$$

Существует такой момент времени $t_k = 2\pi J / \Delta M_0$, начиная с которого (т. е. при $t > t_k$) угол поворота тела становится полностью неопределенным, так как $\Delta\varphi$ становится больше 2π .

Полученный результат является совершенно общим в том смысле, что для любой системы существует некое критическое время t_k , начиная с которого не возможны никакие определенные предсказания поведения механической системы. Критическое время определяется размером начальной области фазового пространства и характером самой системы, в основном ее сложностью, т. е. числом степеней свободы или числом независимых воздействий в случае одного тела.

Так, например, если вывести из положения равновесия незатухающий секундный маятник путем сообщения ему некоторой угловой скорости, заданной с точностью одной тысячной, то его положение нельзя будет предсказать спустя время $t_k = 20$ час. Совершенно иной результат получится для такой сложной системы, как газ. Согласно Борелю [48], изменение начальных координат и скоростей молекул на величину порядка 10^{-100} делает невозможным предсказание движения молекул газа уже спустя миллионную долю секунды. А ведь изменение начальных условий на столь малую величину (10^{-100}) произойдет при перемещении 1 г вещества на 1 см на Сириусе.

Нестабильность движения для произвольной механической системы вытекает из знаменитой теоремы А. Пуанкаре. Согласно Пуанкаре, уравнения классической механики для консервативной системы не допускают никаких аналитических интегралов движения, кроме известных тривиальных: энергии, импульса и момента импульса. Многие другие величины могут выступать как постоянные того или иного движения, ибо число интегралов движения для системы с i степенями свободы равно $2i - 1$. Но их нельзя выразить в виде аналитических функций. Это означает, что любое видоизменение постановки задачи может породить резкое и неожиданное

изменение этих «постоянных». Разрыв может быть следствием самого незначительного изменения любого параметра уравнений движения или начальных условий. Пучок траекторий, выходящих из некоторой малой области фазового пространства, спустя время t_k «взрывается» и расщепляется на несколько меньших пучков, расходящихся в разные стороны.

Простым примером возникновения «разрыва Пуанкаре» служит движение электронного пучка в электрическом поле, обладающем минимумом потенциала (поле обыкновенного диода при большой плотности тока). В зависимости от незначительных вариаций скоростей электроны с полной энергией, близкой к потенциальной энергии в минимуме потенциала, либо преодолевают потенциальный барьер, либо отражаются от него.

Нестабильность движения, существование конечного промежутка времени, в течение которого законы механики способны описывать движение, означают наличие еще одной границы применимости классической механики, не зависящей от ограничений, накладываемых теорией относительности и квантовой механикой. *Классическая механика применима к решению данной, определенной задачи, если можно задать начальные условия (т. е. область $\Delta_0 = \Delta q_0 \Delta p_0$) с такой точностью, чтобы за рассматриваемое в задаче время τ можно было предсказать поведение системы с требуемой точностью.* Разброс начальных данных должен позволять предсказание значений координат и импульсов системы с погрешностью, не превышающей некоторое предельное значение $\Delta = \Delta q \Delta p$. Это возможно лишь при $t < t_k$.

Многие практически очень важные задачи решаются в рамках классической механики в два или несколько этапов. Хорошим примером служит задача об определении траекторий космических кораблей. Из-за неточной фиксации начальных условий и действия различных случайных факторов (нерегулярности в работе двигателей и т. д.) можно предсказать траекторию движения корабля лишь с определенной точностью, которая уменьшается по мере увеличения времени полета. Но часто (например, при вхождении корабля в атмосферу Земли после облета Луны) траектория должна быть задана исключительно точно. Поэтому требуется производить уточнение положения и скорости корабля, с тем чтобы можно было ввести необходимую коррекцию траектории для

выхода на нужную орбиту. В данной задаче критическое время t_k достаточно велико, и поэтому число необходимых коррекций мало.

Постановка и решение динамических задач имеют смысл лишь для не очень сложных систем. Если же система взаимодействующих частиц имеет огромное число степеней свободы, как, например, газ, то критическое время столь мало, что применять к таким системам законы классической механики уже бессмысленно. Фактически ньютоновская механика применима для рассмотрения случаев, когда сравнительно простые силы вызывают движения, которые могут оказаться весьма сложными. Так, например, простые силы всемирного тяготения обуславливают очень сложные траектории планет, если учитывать не только притяжение их к Солнцу, но и взаимное влияние друг на друга.

Для сложных же систем достаточно точная постановка задачи (определение начальных условий и задание сил между телами) не проще ее решения. Для поведения большого числа частиц характерны новые типы законов, не сводимые к законам механики, — законы статистической физики. В этой теории используется лишь один интеграл движения — энергия, который, согласно Пуанкаре, обладает устойчивостью по отношению к вариациям начальных условий и параметров в уравнениях движения.

Движение отдельных тел и, в частности, атомов имеет смысл рассматривать с помощью уравнений Ньютона в том случае, когда число тел, взаимодействующих с данным, не слишком велико. Необходимо, чтобы число связей данного тела с окружающим миром, способных заметным образом изменить состояние его движения, не было очень большим. Для макроскопических тел эти условия обычно выполняются. Применение же законов классической механики к молекуле или броуновской частице лишено смысла.

Борн, Блохинцев и другие справедливо подчеркивают, что классическую механику можно и нужно представлять в статистической форме не только для описания движения большой совокупности частиц, но и для описания движения отдельной частицы даже в простейших условиях. Начальные условия должны задаваться посредством распределения координат и импульсов, а не их точными значениями. Иными словами, нужно задавать

функцию распределения $f(q, p, t_0)$ в момент времени t_0^*). Вместо системы уравнений Гамильтона (или аналогичных им) более последовательно использовать уравнение Лиувилля для функции распределения

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial H}{\partial q_i} \frac{\partial f}{\partial p_i} - \frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial f}{\partial q_i} \right),$$

представляющее собой уравнение непрерывности в фазовом пространстве (здесь H — гамильтониан системы).

Соответствующая этому уравнению постановка задачи эквивалентна рассмотрению движения совокупности большого числа идентичных механических систем, отличающихся друг от друга начальными условиями. Переход к обычной постановке динамической задачи с точно фиксированными начальными значениями q_0, p_0 осуществляется заданием начальной функции распределения в виде произведения δ -функций Дирака, т. е.

$$f(q, p, t_0) = \delta(q - q_0) \delta(p - p_0).$$

Но нельзя забывать, что такое точное задание начальных условий невозможно.

Вывод, который можно сделать из проведенного рассмотрения, кажется на первый взгляд парадоксальным, хотя достаточных оснований для сомнений в его правильности нет. *Главное отличие квантовой механики от классической заключается совсем не в статистическом характере перзой.* И та и другая теория, в сущности, должны формулироваться на языке вероятностей.

Основное различие обеих механик состоит в том, что в квантовой механике первичной величиной служит не вероятность, а ее амплитуда — волновая функция Ψ . Это приводит к интерференции вероятностей — явлению, не имеющему аналога в классической механике. Складываются при наложении волновых полей не вероятности, а, в соответствии с принципом суперпозиции, волновые функции. Поэтому плотность вероятности $|\Psi|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + \Psi_1^* \Psi_2 + \Psi_1 \Psi_2^*$ содержит интерференционные члены $\Psi_1^* \Psi_2 + \Psi_1 \Psi_2^*$, отсутствующие в классической теории.

*) Здесь под q и p следует понимать $6N$ переменных, где N — число степеней свободы.

Еще одно существенное различие связано с принципом неопределенностей Гейзенберга, согласно которому распределения вероятностей для координат и импульсов не могут быть независимыми, как в классическом случае.

Оба эффекта зависят от постоянной Планка \hbar , и одно их наличие, согласно замечанию Борна, приводит к необходимости статистической трактовки теории. В классической же механике отказ от статистической трактовки или ее привлечение зависят от того, считать ли понятие бесконечно точного измерения физически осмысленным или нет.

Конечное заключение, к которому приходит Борн, на наш взгляд, в своей основе правильно, если под термином «детерминизм» понимать господство динамических законов, а под термином «индетерминизм» — отрицание их основополагающей роли. «Обычное утверждение, что классическая механика детерминистична, является, таким образом, неправильным. Возражения против статистической интерпретации квантовой механики, которая основывается на индетерминизме, лишаются всяких оснований. Как получается, что этот ложный идеал так прочно укоренился в головах даже превосходных исследователей, — это не физическая проблема, а психологическая, которая, вероятно, может быть понята из развития физической картины мира со времен Ньютона» ([33], стр. 450).

Однозначные связи, вводимые в механике Ньютона, по существу лишь создают иллюзию абсолютного детерминизма и не могут считаться самыми глубокими законами природы.

Можно попытаться (как часто и делается) опровергнуть данный вывод, ссылаясь на то, что в приведенных выше рассуждениях упор делается на возможности предсказаний движения, на возможности точной фиксации начальных условий и т. д. Нельзя, мол, путать возможности предсказаний (они всегда ограничены) с тем, что «на самом деле», в принципе, движение точно подчиняется динамическим законам.

Однако если с этим согласиться, то тогда уже следует твердо стать на точку зрения людей, считающих, что в природе «...господствует лишь простая, непосредственная необходимость. Что в этом стручке пять горошин, а не четыре или шесть, что хвост этой собаки длиной в пять

двоймов...— все это факты, вызванные не подлежащим изменению сцеплением причин и следствий, неизбежной необходимостью, и притом так, что уже газовый шар, из которого произошла солнечная система, был устроен таким образом, что эти события должны были случиться именно так, а не иначе»... Однако «С необходимостью этого рода мы тоже еще не выходим за пределы теологического взгляда на природу. Для науки почти безразлично, назовем ли мы это, вместе с Августином и Кальвином, извечным решением божьим, или, вместе с турками, кismetом, или же необходимостью. Ни в одном из этих случаев нет и речи о прослеживании причинной цепи. Поэтому как в том, так и в другом случае мы ничуть не становимся умнее. Так называемая необходимость остается пустой фразой, а вместе с этим и случай остается тем, чем он был» [49] (курсив наш.— Г. М.).

Конечно, всем знакомо это высказывание Ф. Энгельса. Его суть имеет прямое отношение к попыткам выдать динамические законы за выполняющиеся в принципе совершенно точно и, следовательно, с железной необходимостью приводящие к строго определенным следствиям. В действительности же обращение к словам «в принципе» не «делает нас умнее» и нисколько не приближает к пониманию окружающего мира. Здесь слова «в принципе» означают на самом деле отход от практики естественных наук с их строгим требованием необходимости экспериментальных подтверждений всех своих утверждений. Они попросту не научны и способны породить лишь бесплодные дискуссии, в которых никто ничего и никому не может доказать окончательно.

§ 3. Границы применимости динамических законов для систем с большим числом частиц

К динамическим теориям, описывающим поведение систем из огромного числа частиц, относятся термодинамика, механика сплошных сред, макроскопическая электродинамика Максвелла и теория гравитации. Если динамические законы для систем с небольшим числом тел или частиц (классическая механика, классическая теория микрополей, базирующаяся на уравнениях Максвелла — Лоренца) выполняются тем лучше, чем меньше частиц в системе или чем меньше число независи-

мых воздействий, испытываемых ими *), то для динамических законов, рассматриваемых в данном параграфе, дело обстоит совершенно иначе.

Если система состоит из очень большого числа частиц, то описывающие ее поведение динамические законы выполняются тем точнее, чем больше частиц содержится в данной системе. Это связано с тем, что динамические закономерности в теориях типа термодинамики представляют собой усредненные законы поведения коллективов из огромного числа частиц. Динамические же законы типа закономерностей классической механики, напротив, приспособлены для описания поведения отдельных объектов или сравнительно небольшого их числа. В этих двух типах динамических законов рассматриваются крайние случаи очень большого и очень малого числа тел. Отметим, кстати, что наиболее трудны для описания промежуточные случаи, когда, с одной стороны, частиц слишком много, чтобы к ним можно было успешно применять закономерности поведения отдельных объектов (будь то законы классической или квантовой механики), с другой стороны, — слишком мало, чтобы полностью обнаруживались характерные для больших коллективов особенности поведения. К подобным системам относятся, например, атомные ядра тяжелых элементов и сложные молекулы, в первую очередь органические.

Динамические законы, описывающие поведение совокупности большого числа частиц, пригодны в тех случаях, когда для исследуемых процессов не существенны ни флуктуации параметров системы в целом или в ее больших частях (обычно эти флуктуации малы), ни значительные флуктуации в малых частях рассматриваемой системы. Именно в таких случаях справедливы законы термодинамики и механики сплошных сред, а электромагнитные явления можно описать в рамках макроскопической электродинамики Максвелла. В предыдущих главах об этом говорилось достаточно подробно, и теперь можно ограничиться несколькими словами.

Динамические законы рассматриваемого типа оказываются справедливыми в среднем для очень большого числа частиц и теряют силу при переходе к малому

*) В теории поля имеется в виду малое число заряженных частиц. Число фотонов должно быть большим, для того чтобы было пригодно классическое приближение.

числу частиц, когда необходимо пользоваться статистическими законами. Это связано с тем, что флуктуации физических величин обусловлены конечностью числа частиц и системы. Средний квадрат флуктуации аддитивной величины Φ пропорционален числу частиц N , т. е.

$$\overline{(\Delta\Phi)^2} \equiv \overline{(\Phi - \bar{\Phi})^2} \propto N,$$

а относительная ее флуктуация обратно пропорциональна \sqrt{N} :

$$\frac{\sqrt{\overline{(\Delta\Phi)^2}}}{\bar{\Phi}} \propto \frac{1}{\sqrt{N}}.$$

Уменьшение относительных флуктуаций с ростом числа частиц обусловлено статистической независимостью отдельных малых частей системы.

При малом числе частиц флуктуации становятся настолько значительными, что динамическое описание теряет смысл.

Ранее уже приводились примеры существенных макроскопических эффектов для системы в целом, вызываемых флуктуациями в малых ее объемах и не объясняемых динамическими теориями. Так, голубой цвет неба целиком обусловлен флуктуациями плотности воздуха в малых объемах.

При определенных условиях флуктуации плотности могут сильно возрастать. Например, в критическом состоянии, когда давление очень слабо зависит от объема, появляются не только большие флуктуации, но и возникает корреляция между ними. Это приводит к аномально большому рассеянию света (критическая опалесценция), изменению поглощения и скорости распространения ультразвука и т. д.

Примером, показывающим влияние малых флуктуаций на параметры систем в целом, служат шумы в радиотехнических устройствах. Из-за флуктуаций не существует «точного», постоянного значения тока или напряжения, что особенно важно при слабых токах. Флуктуации тока, напряжения и мощности играют принципиальную роль в современной радиотехнике, налагая определенные пределы на эффективность и надежность каналов радиосвязи. Чувствительность современной радиоаппаратуры, применяемой, например, в радиоастрономии и для кос-

мической радиосвязи на десятки миллионов километров, столь велика, что борьба с шумами, помехоустойчивость систем, представляет важнейшую задачу. Современная теоретическая радиотехника уже не может базироваться на одних динамических законах. Она немислима без использования статистических закономерностей.

В некоторых случаях, например при турбулентном течении в газах, жидкостях или плазме, случайные нерегулярности течения не затухают, как при ламинарном течении, а, постепенно нарастая, принимают макроскопические масштабы. Для описания такого течения, как уже говорилось выше, следует использовать статистические методы. Как и в классической механике, для времен, больших критических, при турбулентном течении динамическое описание теряет смысл, несмотря на динамический характер самих уравнений движения сплошной среды.

В теории гравитационного поля учет флуктуаций поля в малых объемах, вызванных флуктуациями плотности, не может быть существенным ни при каких процессах, так как гравитационные силы являются ультраслабыми. Но в космических масштабах, вследствие неаддитивности энергий гравитирующих систем, флуктуации могут оказаться значительными при увеличении числа взаимодействующих тел.

Впрочем, сомнений в том, что динамические законы для систем, состоящих из большого числа частиц, являются приближенными, а более точное описание дается соответствующими статистическими законами, обычно ни у кого не возникает. Здесь ситуация более прозрачна, чем в случае динамических законов, описывающих поведение отдельных объектов.

§ 4. Детерминизм Лапласа как выражение примата динамических законов

При обсуждении соотношения между динамическими и статистическими закономерностями нельзя обойти молчанием знаменитую формулировку принципа причинности, данную Лапласом: «Ум, которому были бы известны для какого-либо данного момента все силы, одушевляющие природу, и относительное положение всех ее составляющих частей, если бы вдобавок он оказался

достаточно обширным, чтобы подчинить эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движения величайших тел Вселенной наравне с движением мельчайших атомов: не осталось бы ничего, что было бы для него недостоверным, и будущее, так же как и прошлое, предстало бы перед его взором» ([50], стр. 9). Лаплас представлял себе работу этого «обширного разума» похожей на работу астронома, предсказывающего положение небесных тел на основе знания их координат и скоростей в начальный момент. Но только «обширный разум» может оперировать с любым числом тел, взаимодействующих друг с другом посредством любых сил. «Ум человеческий,— продолжает Лаплас,— в совершенстве, которое он сумел придать астрономии, дает нам представление о слабом наброске этого разума... Все усилия духа в поисках истины постоянно стремятся приблизить его к разуму, о котором мы только что упоминали, но от которого он останется всегда бесконечно далеким» ([50], стр. 10).

В нашей литературе многократно отмечался метафизический характер детерминизма Лапласа и приводилась его всесторонняя критика. Поэтому, чтобы избежать повторения известных вещей, мы остановимся подробно на одном моменте, существенном для нашего исследования.

Предварительно, впрочем, хочется обратить внимание на любопытное замечание Франка по поводу формулировки Лапласа. Лаплас, отмечает Франк, вводя в формулировку причинности некий «верховный разум», конечно, думал, что это только удобный способ выразиться и что «верховный разум» можно устранить, а принцип причинности можно сформулировать, ссылаясь только на человеческие способности ([51], стр. 404). Однако это не так просто. Учитывая неустойчивый характер механического движения, о котором подробно говорилось в § 2 данной главы, мы — даже при допущении непреложной справедливости ньютоновской механики для всех физических явлений — не вправе делать заключение о том, что будущее состояние можно однозначно определить из произвольного начального состояния, которое мы наблюдаем. Если принять во внимание последнее замечание, то представляется маловероятным, что лапласовский «всеведущий разум» можно будет заменить человеческим. «Идея всеобщего предопределения,— замечает далее Франк,— по-видимому, связана с сущест-

вованием «сверхчеловеческого или сверхъестественного» существа» ([51], стр. 417).

Теперь перейдем к основному для нас моменту в формулировке детерминизма по Лапласу. Метафизическая сущность принципа причинности в лапласовской форме, делающая его неприемлемым для физики вообще, состоит не в простом распространении законов классической механики на все явления природы, как это часто считают. По существу, вместо классической механики мы можем рассматривать *любую динамическую закономерность* и формулировать классический детерминизм так: по точно заданному начальному состоянию системы (импульсам и координатам в частном случае классической механики) можно однозначно определить ее поведение в прошлом и будущем. Именно такая формулировка выражает сущность высказывания Лапласа, хотя и не совпадает с ним буквально. Поэтому *отказ от всеобъемлющего значения классического детерминизма является отказом от признания всеобъемлющего значения динамических законов, но не отказом от детерминизма и причинности вообще*. Отказ от классического детерминизма необходим не только в микромире (там это очевидно вследствие статистического характера квантовой механики), но и при исследовании макроскопических явлений.

Несомненно, что лапласовский детерминизм отражает определенные стороны движения макроскопических тел, и в этом отношении нельзя считать его совершенно ложным. Но абсолютизация его как *точного утверждения* недопустима. Лапласовский детерминизм выражает то понимание необходимости, которое имеет смысл в любых динамических законах, и он приближенно справедлив в той же мере, как и динамические законы. С утверждением главенствующего значения статистических закономерностей исчезает сверхчеловеческий идеал, поставленный перед наукой концепцией абсолютного детерминизма, и исчезает сама идея «всеведущего сознания», для которого заранее детерминированы судьбы мира.

Перейдем теперь непосредственно к философскому обоснованию нашего основного тезиса о первичности статистических законов.

ГЛАВА V

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ КАК НАИБОЛЕЕ ГЛУБОКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ СВЯЗЕЙ В ПРИРОДЕ

§ 1. Диалектическая взаимосвязь необходимого и случайного в статистических закономерностях

Во всяком реальном процессе или явлении необходимость, присущая их природе, пробивает себе дорогу сквозь толпу случайностей. Иными словами, между необходимым и случайным всегда объективно существует тесная связь, сложные взаимоотношения, которые вскрываются основным, по выражению В. И. Ленина, законом диалектики — законом единства противоположностей. Вот эти-то сложные взаимоотношения и не вскрываются в рамках динамических законов. Связь необходимого и случайного не может быть отражена в рамках динамических законов, так как они совершенно игнорируют случайное. В динамической закономерности формулируется тот средний необходимый результат, к которому приводит течение процессов, но сложный характер установления данного результата не рассматривается, поскольку выходит за рамки закономерности данного типа. При рассмотрении достаточно обширного круга вопросов, когда отклонения от необходимого среднего ничтожны, такое описание процессов вполне удовлетворительно. Однако и в этом случае оно может считаться удовлетворительным при условии, что нас не интересуют те сложные взаимоотношения, которые приводят к необходимым связям, и мы ограничиваемся констатацией этих связей в динамических законах. Надо отчетливо представлять себе, что абсолютно точных, однозначных связей, фик-

сируемых существующими динамическими законами, в природе просто нет. В реальных процессах всегда происходят неизбежные отклонения от средних — случайные флуктуации, которые только при определенных условиях не играют существенной роли.

Динамические законы не способны описывать явления, когда флуктуации значительны, и, что также важно, не способны предсказывать, при каких именно условиях они становятся существенными, т. е. при каких именно условиях мы уже не можем рассматривать необходимое в отрыве от случайного. В динамических законах необходимость выступает в метафизической форме, огрубляющей ее действительное содержание.

Отсюда мы приходим к выводу, что статистические законы глубже динамических, так как они свободны от отмеченной ограниченности последних. Не случайно статистические законы возникают вслед за динамическими. Они действительно являются более глубоким этапом познания.

Поясним сказанное на двух примерах. Движение твердого тела в газах или жидкостях с малой скоростью вполне удовлетворительно описывается механикой Ньютона путем введения силы трения $F = kv$, где v — скорость тела, а k — коэффициент трения. Уравнение движения дает в этом случае однозначную связь между ускорением и скоростью. Процесс движения рассматривается как абсолютно необходимый. Внутренняя сущность явлений, приводящих к установлению данной силы трения, не рассматривается.

В действительности же здесь дело обстоит так. Сила трения появляется в результате столкновений с телом молекул окружающей среды, движения которых случайны по отношению к движению тела. Эти соударения с необходимостью приводят к возникновению силы, пропорциональной скорости. Сила — некоторый средний результат ударов молекул. Необходимость (установление определенной средней силы) пробивает себе дорогу сквозь толпу случайностей (случайных по отношению к движению тела движений молекул). В динамическом законе этот сложный процесс совершенно не отражен. Дан только средний необходимый результат. Описание же в рамках статистических закономерностей вскрывает сущность процесса, приводящего к появлению силы, пропорциональной скорости. Одновременно можно

вычислить не только среднюю величину силы, но и ее отклонение от среднего, а также установить, при каких условиях динамическое описание процесса становится невозможным. При очень малой массе тело представляет собой броуновскую частицу и динамическое описание ее поведения уже невозможно.

Другой пример. Второй закон термодинамики, имеющий динамическую форму, верно отражает поведение совокупности большого числа частиц. Но он не вскрывает сущности процессов, приводящих к возрастанию энтропии, а дает только необходимый средний результат. Этот закон не показывает, как вследствие сложного процесса взаимодействия молекул необходимое, заключающееся здесь в стремлении системы к наиболее вероятному состоянию, пробивает себе дорогу сквозь толпу случайностей, состоящих здесь в случайном поведении молекул по отношению к поведению всей массы вещества в целом.

Крайне существенно (это уже отмечалось во введении), что статистические законы отнюдь не являются законами случайного. *Как и любые законы природы, статистические законы выражают необходимые связи в природе.* Поэтому вряд ли допустима терминология, применяемая Бомом и др., согласно которой динамические закономерности называются причинными (и считаются отражающими необходимые связи в природе), а статистические — закономерностями случайного. Здесь дело не только в неправильной терминологии. Отсюда уже один шаг до якобы логически неизбежного вывода о том, что динамические законы глубже статистических, ибо именно они являются «причинными», или «необходимыми».

Главное отличие статистических законов от динамических — в учете случайного (флуктуаций). Главное же содержание статистических законов — в отражении необходимых связей в природе. Таким образом, указанная терминология правильно отражает существенное различие динамических и статистических законов, но главное содержание статистических законов предстает при этом в неправильном освещении.

Недостаточное понимание того, что статистические законы выражают необходимые связи, является, по нашему мнению, одной из наиболее существенных причин недооценки роли и значения этих законов. Как динамические, так и статистические законы выражают

необходимые связи. Но в статистических законах, в отличие от динамических, необходимость выступает диалектически, в неразрывной связи со случайным. В определенном смысле она основана на случайности, а сама случайность в свою очередь выступает как форма проявления необходимости. Статистические средние, вычисление которых и составляет главную задачу статистической физики, с необходимостью устанавливаются при определенных условиях. Но что представляет собой это необходимое среднее? В каждый данный момент состояние системы не совпадает точно со средним. Всегда возникают случайные отклонения от среднего — флуктуации. Однако они происходят в ту и другую сторону от среднего, и именно поэтому само статистическое среднее устанавливается с необходимостью. В этом смысле можно сказать, что необходимое среднее определяет себя как случайность, так как любое мгновенное состояние системы случайно. Из условий, в которых находится система, и из ее свойств с необходимостью вытекает только определенное среднее.

Отклонения от среднего — флуктуации — случайны в том смысле, что из условий, в которых находится система, совсем не следует, что в данный момент отклонение от среднего имеет определенную величину. Статистические законы позволяют только вычислить вероятность того или иного отклонения, а также дисперсию, т.е. среднее значение квадрата отклонения величины от ее среднего.

Вместе с тем, в статистических законах случайное — флуктуации — выступает как форма проявления необходимости. Именно совокупность случайных мгновенных состояний системы выявляет необходимое среднее. Сам факт существования флуктуаций в рамках статистических закономерностей необходим.

Таким образом, характер статистической закономерности прямо подтверждает концепцию о внутренней связи необходимого и случайного; он подтверждает знаменитое высказывание Гегеля, приведенное Ф. Энгельсом в «Диалектике природы», о том, что случайное необходимо, что необходимость сама определяет себя как случайное и что, с другой стороны, случайность есть скорее абсолютная необходимость. Ввиду очень важного значения последнего положения для понимания статистических закономерностей рассмотрим в деталях взаимо-

связь необходимого и случайного на простом примере статистического закона — распределения молекул по скоростям, открытого Максвеллом.

Если в сосуде имеется газ заданной температуры, то в нем с необходимостью устанавливается определенное распределение по скоростям. Это наивероятнейшее распределение дает среднее число молекул, скорости которых лежат в любом данном интервале. Здесь, как и вообще в статистических закономерностях, именно средние значения могут рассматриваться как необходимые. Но каждая молекула в результате тех или иных столкновений может преобрести любую скорость. Скорость любой молекулы случайна по отношению к среднему распределению скоростей. Поэтому и само распределение молекул по скоростям в данный момент времени случайно по отношению к необходимому среднему распределению, так как в любой момент времени эти распределения не совпадают друг с другом. Всегда имеются отклонения от среднего, но они возникают с равной вероятностью по обе стороны от среднего распределения, и именно поэтому в среднем существует определенное распределение по скоростям, которое можно зарегистрировать экспериментально. Число молекул со скоростями в данном интервале то больше, то меньше среднего. В этом смысле можно сказать, что *необходимость* (среднее значение) определяет себя как *случайность*, ибо любое мгновенное распределение по скоростям случайно.

Формулировка К. Маркса — «необходимость пробивает себе дорогу сквозь толпу случайностей» — наилучшим образом характеризует отношение необходимого и случайного в статистическом законе. Из свойств данной совокупности частиц с необходимостью следует установление определенного распределения, несмотря на непрерывные флуктуации. Это происходит потому, что существует одно-единственное распределение, являющееся наиболее вероятным из всех возможных.

С другой стороны, случайные мгновенные распределения по скоростям в своей совокупности выявляют необходимое среднее. Тем самым случайное выступает как форма проявления необходимости. Но вместе с тем флуктуации случайны в том смысле, что из условий, в которых находится газ, совсем не следует, что в данный момент отклонение от среднего должно иметь какую-либо определенную величину, тогда как само среднее

значение из этих условий вытекает с необходимостью.

Однако такая случайность (флуктуации) есть скорее абсолютная необходимость, так как то или иное значение скоростей молекул определяется соответствующими ударами соседних молекул; оно причинно обусловлено.

Диалектическая связь необходимого и случайного в статистических законах является отражением объективного положения вещей. Необходимое в процессах природы всегда теснейшим образом переплетается со случайным. Поэтому соотношение между динамическими и статистическими законами не принадлежит к тому же типу, что и соотношение между необходимым и случайным. Как те, так и другие законы выражают присущую природе необходимость. Но динамические законы отражают ее в абстрактной, сильно огрубленной форме. Необходимость, выступающая в статистических законах как среднее бесчисленного множества случайных состояний, в динамических законах рассматривается как нечто строго и однозначно определенное. Тот факт, что все фундаментальные теории современной физики являются статистическими и содержат в качестве приближения соответствующие динамические теории, неопровержимо свидетельствует об отражении статистическими теориями именно необходимых связей.

В статистической закономерности необходимое и случайное столь тесно переплетены между собой, что их можно рассматривать как отражение в нашем сознании противоречивых тенденций объективной закономерности. Закономерность же представляет собой их единство с преимущественным значением необходимого.

Необходимое и случайное в объективных процессах находят свое отражение в рамках законов определенного типа — статистических законов. Рассмотрение же динамических и статистических законов как закономерностей необходимых и случайных событий, по существу, означает, что если в природе между необходимым и случайным и есть объективная связь, то она не находит отражения ни в одном физическом законе. Нельзя, например, согласиться с утверждением, приведенным во введении (см. стр. 13), о том, что реально существующие динамическая и статистическая закономерности представляют собой единство противоположностей. Противоположны необходимое и случайное, а не динамические

и статистические законы. Все известные в физике динамические законы являются приближением статистических законов.

В статистических законах ставится задача вычисления вероятности обнаружения системы в определенной области фазового или конфигурационного пространства. Если не задавать начальное состояние в виде бесконечно узкого дельтаобразного распределения, то вероятность точного значения любых параметров системы равна нулю. В отличие от динамических законов, здесь с самого начала считается, что нельзя так задать состояние системы (дельтаобразное распределение), чтобы дальнейшая ее эволюция была однозначно предreshена. Такая постановка задачи означает, что присущая природе объекта необходимость проявляется только в виде среднего.

В примечании к одной из статей Борна [47] Суворов справедливо отмечает: «Марксизм не признает детерминизм, исключаящий случайность, его скудоумие критиковал Энгельс еще 80 лет назад, а Маркс при рассмотрении экономических процессов в капиталистическом обществе по существу дал анализ соотношения динамических и статистических закономерностей». Это высказывание, несомненно, заслуживает подробного рассмотрения и развития.

В основе выработанных классиками марксизма воззрений на необходимое и случайное лежит исследование законов как естественных наук, так и в первую очередь законов, управляющих развитием общества. Хотя сам факт установления связи необходимого и случайного принадлежит Гегелю, наличие этой связи не было достаточно обосновано в его работах фактическими данными и данными, касающимися истории развития науки. Поэтому, по словам Ф. Энгельса, современное ему естествознание предпочло игнорировать диалектическую связь необходимого и случайного, как парадоксальную игру слов, как противоречащую себе самой бессмыслицу. Недооценка общетеоретического значения статистических закономерностей в наши дни свидетельствует о продолжающемся недоверии к существованию неразрывной связи необходимого и случайного в любом явлении, в любом процессе.

Для Ф. Энгельса теория естественного отбора Дарвина, теория образования видов, явилась прямым дока-

зательством диалектической связи необходимого и случайного. «Показать, что теория Дарвина является практическим доказательством гегелевской концепции о внутренней связи между необходимостью и случайностью» [52], — записывает он в своем конспекте. Метафизическое понимание необходимости казалось ему, как и К. Марксу, несовместимым с историческими законами, в которые входит такой элемент, как человеческое сознание.

В настоящее время, как нам представляется, лучшим доказательством внутренней связи необходимого и случайного являются статистические законы физики, которые во времена Ф. Энгельса еще не были открыты. В физике эта связь отражена в точно сформулированных количественных законах, что, конечно, весьма существенно.

Взаимосвязь и взаимопроникновение необходимого и случайного представляют собой основную качественную особенность статистических законов, в которые они вошли стихийно, без сознательного учета законов диалектики, хотя последние уже были открыты к тому времени. Но они вошли с неизбежностью, ибо такова сущность природы, и законы, ее выражающие, не могут игнорировать диалектику необходимого и случайного.

Динамические и статистические законы физики — это два возможных типа закономерностей, которые имеют в ней строгую математическую форму. Главное различие между ними, если не говорить о количественной стороне, — различие в философском отношении — состоит, как нам представляется, в понимании внутренней структуры необходимости; в статистических законах она выступает в диалектической связи со случайным, в динамических — как абсолютная противоположность случайного.

Если это так, то любые законы, касающиеся более сложных форм движения материи, чем формы движения, рассматриваемые в физике, можно разделить на два типа в зависимости от характера понимания в них необходимости. Отсутствие количественной формулировки законов здесь несущественно. Можно назвать статистическим любой закон, в котором необходимость выступает в тесной связи со случайным.

Конечно (это нужно подчеркнуть в первую очередь), статистические законы в физике имеют мало общего со статистическими законами в других науках: биологии,

экономике, истории и т. д. Согласно нашему определению общим для всех таких законов должно быть одно: диалектическое понимание необходимого, выражаемого данными законами. Главное отличие физических законов от законов других наук заключается в том, что первые распространяются на простейшие формы движения материи, включающие множество однородных, сравнительно простых качественно элементов. Условия, в которых протекают физические явления, устойчивы или могут быть сделаны устойчивыми, и, следовательно, можно проводить сколько угодно повторных экспериментов с каким-либо одним объектом. Физические законы допускают сравнительно простую математическую формулировку, позволяя определять количественно как величины средних, так и вероятности тех или иных отклонений от средних.

В биологических и тем более в общественных науках дело обстоит гораздо сложнее. Здесь качественное содержание объектов, подлежащих изучению, неизмеримо сложнее, чем в физике. Кроме того, часто число самих объектов сравнительно мало или объект вообще существует в единственном неповторимом экземпляре. Условия, в которых протекают процессы, сами по себе тоже очень сложны и обычно не являются устойчивыми на протяжении более или менее больших отрезков времени. Поэтому, как правило, основные законы биологии и общественных наук не имеют в настоящее время количественной формы, что, однако, не исключает принципиальной возможности математической формулировки этих законов. На возможность математической формулировки законов экономики указывал К. Маркс.

Отсутствие количественной формулировки основных законов биологии и других наук приводит к сильному различию по форме статистических законов в физике и в этих науках. По существу, основные законы биологических и общественных наук указывают только средний необходимый результат имеющихся в наличии определенных условий. Закономерность же в случайных отклонениях от среднего не вскрывается в общей форме. В общей форме не определяются обычно ни их причины, ни условия, в которых они могут возникать, ни их возможная величина. В каждом отдельном случае отклонение от среднего может иметь свои специфические причины, которые и нужно исследовать именно в данном конкрет-

ном случае. Оценить вероятность таких отклонений в принципе можно, но для этого необходим тщательный анализ условий, характерных для данного случая, который практически не всегда удается провести, ибо причины того или иного отклонения в настоящую минуту могут оказаться очень глубоко скрытыми.

Законы, например, в общественных науках, часто внешне имеют форму динамических законов, так как в самом законе содержится необходимый средний результат и только. Однако эта необходимость рассматривается не метафизически, а в свете диалектики: принимаются в расчет неизбежные отклонения от необходимого среднего в ту или иную сторону, рассматривается их связь со случайным, которая, правда, иногда только констатируется. Считается, что необходимые средние в законах пробивают себе дорогу сквозь толпу случайностей. В этом отношении законы общественных наук можно назвать статистическими в соответствии с приведенным выше общим расширенным определением статистического закона, не подразумевающим обязательной количественной формулировки. Закон эволюции Дарвина, законы общественного развития будут в этом смысле статистическими. Характерно, что явления, рассматриваемые в общественных науках, столь качественно сложны, число связей, причин, взаимодействий, определяющих данный процесс в этих науках, настолько велико, что формулировка законов динамического типа, в которых необходимость понималась бы метафизически, была бы просто невозможной. Не случайно поэтому, что только использование диалектического метода позволило К. Марксу и Ф. Энгельсу положить начало научному подходу к законам развития общества. Как подчеркивал В. И. Ленин, анализ общественных процессов К. Маркс с самого начала вел в рамках рассмотрения массовых экономических процессов.

Приведем несколько примеров, подтверждающих сказанное о характере законов в общественных науках.

З а к о н с т о и м о с т и . Товары продаются по ценам, не совпадающим с их стоимостью, но этот факт не противоречит самому закону стоимости, так как необходимость, выражаемая им, понимается диалектически. Вот что говорит об этом В. И. Ленин: «... сведение стоимости (общественной) к ценам (индивидуальным) происходит не простым, не непосредственным, а очень сложным

путем: вполне естественно, что в обществе разрозненных товаропроизводителей, связанных лишь рынком, закономерность не может проявляться иначе, как в средней, общественной, массовой закономерности, при взаимопогашении индивидуальных отклонений в ту или другую сторону» [53].

Закон прогрессирующего понижения нормы прибыли. Формулируя этот закон, К. Маркс пишет: «Это не только возможно. На основе капиталистического производства так *должно* быть, если оставить в стороне преходящие колебания» [54].

Число примеров можно было бы неограниченно увеличить. Таким образом, закон в общественных науках определяет необходимое среднее, причем учитываются неизбежные по разным причинам отклонения от среднего.

Кроме того, в биологии и в общественных науках уже положено начало количественной формулировке законов, и они носят статистический характер, используют методы математической статистики. Так, во многих случаях выполняются простые статистические законы Менделя для передачи наследственных признаков, имеющие количественную форму. Положено начало установлению количественных статистических законов, управляющих изменчивостью организмов — мутациями.

Количественная сторона процессов в общественных явлениях уже давно исследуется, хотя применяемые здесь математические методы играют гораздо меньшую роль, чем в биологических и тем более в физических науках. Эта задача относится к общественной статистике *). Однако использование общественной статистики оказывается возможным только при исследовании закономерностей, которые, по словам Немчинова, являются «наиболее связанными с данными конкретными условиями времени и пространства» [55], но невозможно вообще, так как сами условия протекания процессов меняются. Статистика представляет собой в общественных науках, по определению В. И. Ленина, анализ так называемых статистических фактов с помощью математических ме-

*) Еще раз подчеркиваем, что у нас термин «статистическая закономерность» употребляется в самом общем смысле: это закон, в котором необходимость понимается в диалектическом смысле, и его нельзя смешивать с термином «статистика», употребляемым, когда говорят о количественной стороне явлений в общественных науках.

годов и, в частности, закона больших чисел. Поэтому для анализа качественной и количественной сторон общественных процессов необходим не единый подход, как в физике, а две самостоятельные науки, которые, правда, тесно связаны между собой, дополняют друг друга.

Успешная разработка математических методов оптимального планирования как в рамках отдельной отрасли производства, так и в общегосударственном масштабе также свидетельствует о проникновении количественных статистических методов в экономические науки.

Добавим еще, что даже известная пословица: «Исключение подтверждает правило» — показывает, как житейская мудрость верно (диалектически) понимает необходимый результат, который вытекает из того или иного правила.

Огромное значение статистических законов для исследования природы и для современной техники было установлено в последнее время. Возникло новое научное направление, занимающееся общими вопросами связи и управления в автоматических машинах, живых организмах и обществе, — к и б е р н е т и к а.

Закономерности, вскрытые первоначально при изучении автоматических устройств, как оказалось, обладают такой большой общностью, что их отчасти можно распространить и на живые организмы. Объединяет столь разнородные объекты, как машины и организмы, принцип управления: движение и действие больших масс и энергий контролируются при помощи малых масс и энергий, несущих информацию. Понятия количества и качества информации играют в кибернетике фундаментальную роль.

Осуществить столь универсальный синтетический подход оказалось возможным только на базе статистических законов. В общем случае количество информации о какой-либо системе с различными вероятностями возможных исходов определяется энтропией так называемой конечной схемы, т. е. задается статистически (конечной схемой событий называется полная их система, задаваемая вместе с вероятностями их появления). Отдельные варианты возможных данных, например отдельные сообщения в теории связи, рассматриваются не как заданные функции времени, а как совокупность различных вариантов, определенных вместе с вероятностями их появления. Не только количество информации, но и

ее качество, ее надежность, определяются статистически. Теория информации оценивает качество информации не по отношению уровней сигнала и помехи, а статистическим методом — по вероятности получения правильной информации. Любая информация рассматривается как результат воздействия двух процессов: регулярного процесса, предназначенного для передачи требуемой информации, и случайного процесса, вызванного действием помехи.

Общетеоретическое значение кибернетики заключается в статистическом рассмотрении взаимодействия информации и системы, причем необходимость выступает как статистическое среднее на фоне случайных помех.

При диалектико-материалистическом анализе сущности и соотношения динамических и статистических законов, а также взаимной связи необходимого и случайного в природе нужно, разумеется, несмотря на все сказанное выше, в первую очередь рассматривать законы физики — наиболее глубокие законы окружающего нас мира. Здесь взаимосвязи наиболее просты и допускают количественную формулировку. История возникновения различных физических теорий с очевидностью демонстрирует более глубокий характер статистических теорий по сравнению с динамическими, которым они приходят на смену.

Именно статистические законы содержат представление о случайных и необходимых причинных взаимосвязях как о двух сторонах любого реального процесса, но не совокупность динамических и статистических законов, как полагает, например, Бом. «...Мы рассматриваем оба класса законов,— пишет Бом,— как приближения в том смысле, что так же, как причинный закон может возникать в виде статистического приближения к среднему поведению большой совокупности элементов, претерпевающих неупорядоченные флуктуации, случайный закон может возникать в виде статистического приближения к действиям большого количества причинных факторов, движущихся существенно независимо. Однако в действительности ни причинные законы, ни случайные законы никогда не могут быть абсолютно правильными потому, что каждый из них утрачивает некоторую сторону того, что присутствует в более широких кругах явлений. При определенных условиях один или другой из этих видов законов может лучше выражать действия

факторов, которые являются преобладающими и, следовательно, более хорошим приближением для этих частных условий» ([1], стр. 206, 207).

С этим мнением Бом о наличии двух типов закономерностей, взаимно дополняющих друг друга, причем в одних случаях существенное схватывает один закон, а в других — другой, согласиться нельзя. Фундаментальные динамические теории — классическая механика, термодинамика, электродинамика Максвелла — могут рассматриваться как приближения соответствующих статистических теорий. Просто очень часто флуктуации несущественны, и мы с полным основанием можем использовать более простые динамические законы вместо более точных, но зато и более сложных статистических. Ни одного ясного примера дополнения законами друг друга Бом не проводит. Нет у него и примеров, показывающих необходимость соответствующего сочетания обеих точек зрения.

Возможно, Бом имеет в виду довольно часто встречающуюся ситуацию: в ряде электродинамических задач достаточно статистическим путем найти величины, характеризующие электромагнитные свойства вещества (электрическую и магнитную проницаемости, электропроводность), и тогда при дальнейших расчетах можно использовать феноменологические уравнения Максвелла, имеющие динамический характер. Точно так же термодинамические функции можно рассчитать только с помощью статистической механики. Но в дальнейшем все соотношения между ними можно получить чисто термодинамическим методом на основе двух начал термодинамики. Здесь в определенном, узком смысле допустимо говорить о взаимном дополнении законов различного типа, но оно весьма условно, если учесть, что как законы термодинамики, так и уравнения Максвелла вытекают из статистической физики.

О несостоятельности рассмотрения законов статистической механики как приближения к «действиям большого количества причинных факторов» уже говорилось в § 3 гл. III. Еще раз мы вернемся к обсуждению этого вопроса, разбирая предложенную Бомом концепцию уровней, согласно которой по мере уточнения наших знаний динамические законы последовательно замещаются статистическими и, обратно, статистические — динамическими.

§ 2. Динамические элементы в статистических закономерностях и законы сохранения

Статистические закономерности значительно сложнее по своей структуре, чем динамические. Это вполне естественно, так как динамические законы являются приближениями соответствующих статистических законов. В любом статистическом законе с неизбежностью присутствуют элементы законов динамических. Но это не дает никакого права считать, что в каких-либо статистических законах, например квантовых, нераздельно сочетаются статистическая и динамическая стороны закономерности явлений.

Нужно совершенно отчетливо представлять себе, прежде всего, в чем состоит отличие статистических законов от динамических и в чем проявляется единство их структуры. Вопрос этот для понимания статистических закономерностей очень важен, и, быть может, следовало бы на нем остановиться раньше. Но достаточно удобно заняться им и сейчас.

Статистические законы отличаются от динамических содержанием понятия состояния системы. В динамических теориях состояние задается точными значениями полного набора всех основных для данной теории физических величин. В механике Ньютона это координаты и импульсы всех частиц, в электродинамике Максвелла — значения напряженностей электрического и магнитного полей в каждой точке пространства для данного момента времени и т. д. В статистических же теориях состояние задается не значениями самих физических величин, а законами их распределения, которые дают вероятности того, что какие-либо физические величины принимают определенные значения. Сами же величины считаются случайными, т. е. не обязательно принимающими определенные значения при заданных внешних условиях. В этом смысле никакой принципиальной разницы между классическими статистическими теориями и квантовой механикой нет. Существенное различие между ними состоит в том, что в классической статистике состояние характеризуется самой функцией распределения, дающей непосредственно вероятности определенных значений физических величин, а в квантовой механике — волновой функцией $\Psi(r, t)$, не имеющей прямого физического смысла. Непосредственный смысл плотности вероятности

имеет квадрат модуля $|\Psi|^2$. Отсюда следует сугубо квантовый эффект интерференции вероятностей, что в конечном счете определяет особые, неклассические свойства объектов микромира.

Характер же связи состояний в различные моменты времени (уравнения движения) в основе своей остается общим и для динамических и для статистических теорий. При заданной функции Гамильтона *начальное состояние системы однозначно определяет конечное состояние как в динамических, так и в статистических теориях*. В статистической механике конечное состояние можно найти из уравнения для функции распределения $f(q, p, t)$, а в квантовой механике — из уравнения Шредингера для $\Psi(r, t)$.

Но раз уже закономерности, в которых состояние характеризуется вероятностным образом, а связь состояний однозначно определяется уравнением движения, мы называем статистическими, то нет никакого смысла говорить о сочетании динамических и статистических законов в рамках некой общей закономерности. *Однозначную связь состояний следует считать лишь динамическим элементом статистического закона*. Именно она в статистической теории означает наличие определенной внутренней необходимости в развитии системы. Без нее статистические закономерности не выражали бы необходимые связи в природе, т. е. их вообще нельзя было бы считать законами.

Другими важнейшими динамическими элементами статистических теорий являются законы сохранения и связанные с ними принципы симметрии, о которых уже говорилось в конце гл. II.

Вероятностные законы, в частности законы квантовой теории, не в состоянии однозначно предсказать, что именно произойдет с определенной системой в данном конкретном случае, т. е. какие именно энергии и импульсы получат частицы после взаимодействия, какие частицы появятся после столкновения двух протонов высокой энергии, когда именно и на какие частицы распадется K^+ -мезон и т. д. Статистический характер явлений окружающего нас мира не позволяет этого сделать.

Однако, если статистическая закономерность и не дает возможности однозначно определить, что именно произойдет, она тем не менее совершенно *однозначно предсказывает, что не может произойти*. Именно, не

могут происходить процессы, нарушающие законы сохранения. Иначе говоря, вероятность процессов, нарушающих тот или иной закон сохранения, равна нулю. В мире, согласно замечанию Форда, царит своего рода демократия: «Все, что может происходить без нарушения законов сохранения, действительно происходит» [56].

В рамках любой статистической теории, например квантовой электродинамики, любой процесс, которому отвечает вероятность, равная нулю, обязательно нарушает один или несколько законов сохранения, и поэтому он происходить не может. Если в данном процессе взаимодействия и взаимных превращений элементарных частиц (а к этому сводятся в конечном счете все события в мире) не нарушается ни один из законов сохранения, то такой процесс с той или иной вероятностью, которую позволяет вычислить теория, будет идти. С этой точки зрения любой закон сохранения представляет собой именно динамический (в смысле однозначности налагаемых им условий) элемент статистической теории. Выполнение законов сохранения обеспечивает протекание процесса с отличной от нуля вероятностью.

Данная точка зрения, по нашему мнению, в принципе правильна. Тем не менее она не отражает полностью значения законов сохранения в современной физике элементарных частиц. Важнейшее значение этих законов обнаруживается прежде всего их в связи с самыми общими принципами, управляющими процессами в природе, — с принципами симметрии. Законы сохранения носят всеобщий характер, пронизывают теории всех типов взаимодействий. Если, к примеру, закон сохранения энергии содержится в каждой конкретной теории и может быть выделен из нее в явной форме, то утверждение о сохранении и превращении энергии вообще является фундаментальным, т. е. охватывает все процессы в природе и не вытекает из какой-либо определенной теории, всегда трактующей лишь ограниченный круг явлений.

Не означает ли это, что законы сохранения представляют собой наиболее глубокие законы природы и к ним в будущем сведется вся физика *)? И так как законы со-

*) Форд в цитированной выше книге дает положительный ответ на поставленный вопрос и готов держать пари на этот счет. Хотя он и пишет, что многие физики разделяют его точку зрения, все же не просто найти столь же ярого сторонника всеобъемлющего характера законов сохранения, как сам Форд.

хранения, по общему мнению, относятся к динамическим, то не означает ли это, что в конечном счете первичными следует считать все же динамические законы?

Можно указать три аргумента против такой точки зрения. В о - п е р в ы х, представляется весьма сомнительным, что совокупности уже известных законов сохранения и тех, которые будут открыты в будущем, окажется достаточно для полного описания всех процессов. По самому своему смыслу закон сохранения — это некий запрет, налагаемый на возможность протекания данного процесса. И поскольку процессы заведомо имеют статистическую природу, совершенно неясно, как законы сохранения с их «да» или нет» смогут полностью описать статистические явления. Придется говорить об определенной вероятности сохранения некоторых величин. Но это уже не будут законы сохранения в том смысле, как мы их понимаем сейчас.

Психологически понятно, почему в настоящее время многие физики усматривают в законах сохранения те законы, к которым, может быть, в будущем сведется вся наука. Сейчас, когда не построена еще полная теория элементарных частиц, наибольшие успехи в этой области принесло использование уже известных и вновь открытых законов сохранения (вследствие своей общности они оказались справедливыми и здесь). Если раньше открытие основных законов данной теории предшествовало открытию соответствующих законов сохранения (механика Ньютона, электродинамика Максвелла), то в современной физике элементарных частиц это не так. Законы сохранения барионного и лептонного зарядов, закон сохранения странности и др. столь просты по форме (суть их нам пока еще мало известна), что их удалось непосредственно вывести из огромного количества экспериментального материала. Теперь теорию с самого начала нужно строить так, чтобы она содержала в себе известные законы сохранения.

Однако делать отсюда выводы об особом, первичном значении законов сохранения вряд ли следует. Эти новые законы, выполняющиеся при превращениях элементарных частиц, открыты первыми скорее всего не потому, что они являются основными, а вследствие своей простоты. Они гораздо проще тех квантовомеханических законов будущего, которые окажутся способными количественно описывать процессы с участием сильных и слабых

взаимодействий. И только такие теории, а не законы сохранения позволят наконец решить фундаментальную проблему спектра масс элементарных частиц.

Второе соображение. Видимо, рано или поздно будет построена некая единая теория элементарных частиц в духе гипотезы Гейзенберга или на основе других; неизвестных пока гипотез. В такой единой теории (а что она должна быть статистической, мало кто сомневается) будут органически содержаться все законы сохранения, а не отдельные их совокупности, как в настоящее время, когда, к примеру, закон сохранения барионного заряда не имеет никакого отношения к квантовой электродинамике. Законы сохранения в единой теории будут выступать лишь как запреты на возможность протекания определенных процессов, т. е. как утверждения о равной нулю вероятности процессов, в которых какая-либо величина не сохраняется. В этом смысле все законы сохранения окажутся не чем иным, как динамическими элементами, вообще говоря, статистической теории. Будущая фундаментальная теория должна включать в себя все симметрии, присущие природе, и тем самым *все законы сохранения, как условия, обращающие в нуль вероятность определенных процессов*.

И наконец, остановимся на последнем аргументе, ставящем под сомнение динамический характер законов сохранения механических величин. Если эти сомнения окажутся оправданными, то два первых аргумента станут почти излишними.

§ 3. Принцип неопределенности и статистический характер законов сохранения механических величин

В квантовой теории динамический характер законов сохранения механических величин отнюдь не столь категоричен, как представляется на первый взгляд. Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса не выполняются (если их понимать прямолинейно) на малых пространственно-временных интервалах.

Начнем с простого и очевидного примера. При вычислении вероятности перехода из начального состояния с энергией E_n , принадлежащего дискретному спектру, в конечное состояние с энергией E_α , принадлежащее непрерывному спектру, под воздействием периодического возмущения частоты ω за время t получается следующее

выражение (см., например, [57]):

$$P_{\alpha n} = C \frac{4 \sin^2 [t (E_\alpha - E_n - \hbar\omega)/2\hbar]}{[(E_\alpha - E_n - \hbar\omega)/\hbar]^2}, \quad (1)$$

где C — некоторый коэффициент пропорциональности. Согласно этой формуле вероятность перехода отлична от нуля даже при $E_\alpha \neq E_n + \hbar\omega$, т. е. когда конечная энергия не равна сумме начальной энергии и энергии возмущения $\hbar\omega$. Лишь при $t \rightarrow \infty$ будем иметь

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{4 \sin^2 [t (E_\alpha - E_n - \hbar\omega)/2\hbar]}{[(E_\alpha - E_n - \hbar\omega)/\hbar]^2} = [2\pi t \delta(E_\alpha - E_n - \hbar\omega)]/\hbar,$$

где δ — дельта-функция Дирака, отличная от нуля только при $E_\alpha = E_n + \hbar\omega$.

В частности, если замкнутая система состоит из двух взаимодействующих подсистем с энергиями E и ϵ , то спустя время Δt повторные измерения энергий дают новые значения E' и ϵ' , не совпадающие с E и ϵ . Согласно формуле (1) при $\omega = 0$ (что соответствует независимости энергии взаимодействия от времени) мы получим, что вероятность перехода из начального состояния в конечное пропорциональна

$$\frac{\sin^2 [\Delta t (E' + \epsilon' - E - \epsilon)/2\hbar]}{(E' + \epsilon' - E - \epsilon)^2}.$$

Наиболее вероятные значения разности энергий конечного и начального состояний равны по порядку величины $\hbar/\Delta t$. Чем меньше интервал времени Δt , тем большие изменения энергии замкнутой системы можно обнаружить. Иными словами, в квантовой механике закон сохранения энергии можно проверить посредством двух измерений с точностью до величины $\hbar/\Delta t$, где Δt — интервал между двумя последовательными измерениями. Таким образом, законы сохранения энергии точно выполняются лишь для бесконечно больших интервалов времени.

В частности, если E и E' — значения энергии исследуемой системы, а ϵ и ϵ' — значения энергии измерительного прибора, с которым система взаимодействует на отрезке времени Δt , то в самом благоприятном случае, когда энергии прибора до и после измерения точно известны ($\Delta\epsilon = \Delta\epsilon' = 0$), получим

$$\Delta(E - E') \approx \frac{\hbar}{\Delta t}. \quad (2)$$

Следовательно, энергию системы на отрезке времени Δt без нарушения ее величины нельзя измерить с ошибкой, меньшей $\hbar/\Delta t$. Так, при квантовомеханическом анализе измерений стационарных значений энергии атома методом Штерна — Герлаха или методом столкновений получается как раз соотношение типа (2) ([58], стр. 372—380). Для того чтобы узнать, какую энергию, E_n или E_m , имел атом до столкновения, необходимо выполнение неравенства

$$|E_n - E_m| \Delta t > \hbar,$$

где Δt — продолжительность опыта.

Аналогично обстоит дело в квантовой теории поля. Матрица переходов для процессов первого порядка (испускания или поглощения фотона свободным электроном) имеет вид

$$iV_1(\sigma, \sigma_0) = \int_{\sigma_0}^{\sigma} H(x) d^4x,$$

где $H(x)$ — оператор энергии взаимодействия, d^4x — бесконечно малый четырехмерный объем, а σ_0 и σ — пространственноподобные гиперповерхности, i — мнимая единица.

Если считать начальное состояние заданным при $\sigma_0 \rightarrow -\infty$ и относить конечное состояние к $\sigma \rightarrow +\infty$, то данное выражение равно нулю. В самом деле, при интегрировании по координатам и времени появляются δ -функции, что обеспечивает выполнение законов сохранения импульса и энергии. Поскольку для рассматриваемого процесса эти законы несовместимы, то $V_1(\infty, -\infty) = 0$. Однако если интервал $\langle \sigma_0, \sigma \rangle$ сохранять конечным (например, при трехмерной форме записи считать t_0 и t конечными), то для матричного элемента перехода получится выражение, отличное от нуля, а именно:

$$|V_1|^2 \sim \frac{1 - \cos[(E' - E_0)t/\hbar]}{(E' - E_0)^2},$$

где E_0 и E' — начальное и конечное значения энергии.

Таким образом, в данном случае из расчетов вытекает только закон сохранения импульса, так как интегрирование ведется по всему пространству. Что же касается энергии, то вероятность перехода имеет заметную

величину для $E' - E_0 \approx \hbar/\tau$. Иными словами, в квантовой теории поля энергия на интервале времени τ определена с погрешностью $\Delta E\tau \gtrsim \hbar$.

Рассмотренный здесь процесс испускания или поглощения свободным электроном фотона служит одним из примеров виртуальных процессов, о которых было рассказано в гл. II. Понятия виртуальных процессов и виртуальных частиц, рождаемых в этих процессах, занимают центральное место в современной квантовой теории. В ней взаимодействие обычных реальных частиц в подавляющем большинстве случаев рассматривается как результат рождения и поглощения свободными частицами виртуальных частиц, причем энергия и импульс частиц до и после реакции остаются неизменными, а во время реакции законы сохранения этих величин не выполняются.

Мы говорили до сих пор только о нарушении закона сохранения энергии по той причине, что пространственный интервал, на котором происходит взаимодействие, оставался нефиксированным. Если же пространственный интервал взять конечным, то законы сохранения не будут выполняться ни для импульса, ни для энергии. На пространственном интервале Δx нельзя проверить закон сохранения импульса с ошибкой, меньшей $\Delta p \approx \hbar/\Delta x$.

Считая, что виртуальные процессы протекают в действительности, мы с неизбежностью приходим к выводу, что закон сохранения энергии выполняется строго лишь в среднем на бесконечном интервале времени, а закон сохранения импульса — в среднем на бесконечном пространственном интервале. Точнее (мы подробно остановимся на этом несколько позже), энергия имеет определенное значение в среднем по большому интервалу времени, а импульс — в среднем по большому интервалу пространства. В течение же малых промежутков времени может «временно нарушаться» закон сохранения энергии, а процессы, протекающие внутри малых объемов, могут сопровождаться «местными нарушениями» закона сохранения импульса. Таковы выводы, к которым приводит аппарат квантовой теории.

Правда, формально виртуальные процессы можно истолковать иначе. Именно, можно считать, что энергия и импульс сохраняются и в процессах, длящихся сколь угодно малое время, но обычная связь между кинетической энергией частицы, ее импульсом и массой, выражаемая соотношением $E = p^2/2m$, нарушается; при больших

скоростях движения нарушается соответствующее релятивистское соотношение $E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4$. Так, в частности, при излучении свободным электроном виртуального фотона можно считать, что энергия сохраняется, но квадрат массы такого фотона как бы становится отрицательным, а сама масса — мнимой, т. е.

$$m_0^2 = \frac{E^2}{c^4} - \frac{p^2}{c^2} < 0.$$

Обе точки зрения формально равноценны. Однако физически более приемлема, по нашему мнению, первая точка зрения.

Предварительно сделаем еще одно замечание. Может быть, в действительности никаких виртуальных процессов не существует и их появление в теории есть лишь следствие приближенных методов расчета взаимодействия частиц с помощью теории возмущений? Такое предположение высказывалось неоднократно. Итак, существуют ли виртуальные частицы?

По двум причинам ответить на этот вопрос далеко не просто. Первая трудность связана с тем, что в микромире все наблюдения по необходимости имеют косвенный, принципиально статистический характер и осуществляются на больших пространственно-временных интервалах. Микрочастицы можно регистрировать только посредством наблюдения макроскопических явлений, которые они вызывают в больших системах, находящихся в неустойчивом состоянии. Получить надежную информацию о характере процессов и свойствах микрочастицы можно, лишь проделав серию экспериментов, в которых одинаковые частицы находятся в одинаковых макроскопических условиях.

Вторая трудность связана со следующим обстоятельством. Если для доказательства существования виртуальных, к примеру, пионов в «шубе» свободного нуклона мы выьем из нее фотоном или другой частицей пион, то мы уже будем иметь дело не со свободным нуклоном, а с реакцией, в процессе которой пион мог бы родиться, если бы его в «шубе» и не было.

Сторонники точки зрения, отрицающей существование виртуальных частиц, исходят из того, что их нельзя обнаружить обычными регистрирующими устройствами: счетчиком, камерой Вильсона и т. д. В частности, при отличной от нуля массе покоя они просто не могут

преодолеть то макроскопическое расстояние (бесконечно большое по масштабам микромира), которое отделяет область, где происходит реакция, от места, где расположен прибор.

Эти рассуждения, однако, по ряду причин недостаточно убедительны. Во-первых, довольно произвольно условие, выполнение которого позволяет частице (или вообще любому объекту, дело не в названии) претендовать на титул «реальной», а именно: она должна иметь возможность проходить макроскопические расстояния и приводить в действие определенные регистрирующие устройства.

Во-вторых, если мы откажем в праве на реальное существование виртуальным фотонам, которые, в частности, обуславливают кулоновское взаимодействие заряженных частиц, то получится следующее. В рамках квантовой теории классическое непрерывное поле Фарадея — Максвелла заведомо не соответствует действительности. Поэтому отказ от реальности виртуальных фотонов, обуславливающих, согласно квантовой теории, кулоновское взаимодействие, означает фактически возвращение к концепции дальнего действия, т. е. к представлению о взаимодействии частиц друг с другом на расстоянии без какого-либо посредника. В данном случае виртуальные частицы могут проходить макроскопические расстояния. Правда, виртуальным фотонам приходится приписывать отрицательный квадрат массы $\left(\frac{E^2}{c^4} - \frac{p^2}{c^2} < 0\right)$, а такие частицы нельзя зарегистрировать счетчиком или другим аналогичным устройством. Это означало бы нарушение закона сохранения энергии в макроскопических масштабах.

Таким образом, мы приходим к выводу, что хотя виртуальные частицы и отличаются от реальных тем, что для них не выполняется релятивистское соотношение между энергией и импульсом, но отказывать им по этой причине в праве на существование нет оснований.

В пользу данной трактовки виртуальных переходов и виртуальных частиц можно добавить еще, что они совершенно естественно появляются в аппарате теории возмущений, и отрицание их физического содержания означает некоторое, не имеющее достаточных оснований недоверие к аппарату теории. Кроме того, никак нельзя считать случайным, что для всех виртуальных процессов

выполняются законы сохранения электрического заряда и всех других квантовых чисел, характеризующих частицы. Если бы такие переходы были воображаемыми, то выполнение для них данных законов сохранения не было бы обязательным. В наблюдаемых превращениях реальных частиц эти законы все равно выполнялись бы.

Итак, квантовая теория приводит к выводу, что сохранение энергии и импульса на малых пространственно-временных интервалах в определенном смысле не имеет места. Во всяком случае, законы сохранения этих величин принципиально нельзя проверить в эксперименте с ошибкой, меньшей $\Delta p \approx \hbar/\Delta x$ и $\Delta E \approx \hbar/\Delta t$. Однако это не вызывает какого-либо беспокойства. Во-первых, величина \hbar настолько мала, что для макроскопических интервалов Δx и Δt законы сохранения практически выполняются в точности. Во-вторых, и это главное, импульс на отрезке Δx , согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга, определен с погрешностью, как раз равной $\Delta p \approx \hbar/\Delta x$. Таким образом, о нарушении закона сохранения импульса, по существу, можно не говорить, поскольку сам импульс на отрезке Δx не имеет фиксированного значения. Отступления от закона сохранения точно укладываются в рамки соотношения неопределенностей.

С энергией дело обстоит несколько сложнее. Время в квантовой механике, в отличие от координат, не является оператором. Оператор энергии — это оператор Гамильтона, зависящий от операторов координат и импульсов. Соответственно время и энергию нельзя рассматривать как некоммутирующие операторы, и, значит, нельзя получить соотношение неопределенностей между энергией и временем таким же методом, как для координаты и импульса и других канонически сопряженных величин. Поэтому соотношение $\Delta E \approx \hbar/\Delta t$ часто интерпретируется (см., например, [57], [58]) лишь как утверждение о невозможности проверки закона сохранения энергии на интервале времени Δt с погрешностью, меньшей $\hbar/\Delta t$. Но в данный момент времени энергию можно определить (измерить) сколь угодно точно. Иными словами, в данный момент времени энергия имеет определенное значение, в отличие от импульса, который определенного значения в точке не имеет.

Если первое утверждение о том, что время не является оператором, возможно, справедливо, то последнее, по нашему мнению, просто неправильно. Энергия в данный мо-

мент времени имеет не больший смысл, чем импульс в точке. На этом мы остановимся подробнее.

Прежде всего отметим, что по вопросу о соотношении неопределенностей между энергией и временем отсутствует единая точка зрения. Этот вопрос излагается (если он вообще излагается) в различных учебниках по квантовой механике не только совершенно по-разному, но часто и противоположным образом. Довольно странная ситуация для такой сложившейся науки, как квантовая механика.

В учебнике Шиффа [59], как и в книгах Бома [60] и Ферми [61], вообще не делается принципиального различия между соотношениями неопределенностей

$$\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar \quad \text{и} \quad \Delta E \Delta t \approx \hbar.$$

Насколько нам известно, только в учебниках Ландау и Лифшица [57] и Блохинцева [58] утверждается, что энергия в определенный момент времени может иметь точно фиксированное значение. В учебнике Давыдова [62], как и во многих других, нет никаких определенных высказываний на этот счет. Наконец, и сам Бор не считал нужным подчеркивать различие между соотношениями $\Delta p \Delta x \approx \hbar$ и $\Delta E \Delta t \approx \hbar$ [63]. Во всяком случае, он не делает столь категорических утверждений, как Ландау и Блохинцев.

В 1945 г. была опубликована статья Мандельштама и Тамма [64], специально посвященная соотношению неопределенностей между энергией и временем. В ней утверждается, что если за время Δt среднее значение \bar{L} некоторой физической величины L меняется на величину $\Delta L = |\bar{L}(t + \Delta t) - \bar{L}(t)|$, то интервал Δt связан с неопределенностью в энергии ΔE соотношением $\Delta E \Delta t \gtrsim \hbar$. Затем появилась статья Фока и Крылова [65], в которой, наряду с замечанием о том, что статья Мандельштама и Тамма весьма интересна, дается совершенно иное толкование соотношению неопределенностей между энергией и временем и вообще смыслу работы предыдущих авторов. Мы не будем детально рассматривать содержание перечисленных выше статей, ибо главное, что из них можно вынести, — это отсутствие ясности в рассматриваемом вопросе. Существенно заметить лишь, что в статье Фока и Крылова отмечаются два толкования соотношения неопределенностей между энергией и временем.

Одно, в смысле Бора, является постулатом или следствием обсуждения мысленных экспериментов и не зависит от формального аппарата квантовой механики. Согласно Бору, неопределенность в приращении энергии объекта за время измерения Δt удовлетворяет неравенству

$$\Delta(E' - E) \Delta t \gtrsim \hbar,$$

где E и E' — энергия объекта до и после измерения.

Второе толкование, Мандельштама — Тамма, не имеет непосредственного отношения к экспериментам по измерению энергии.

По нашему мнению, хотя соотношение $\Delta E \Delta t \approx \hbar$ нельзя получить с помощью формализма квантовой механики столь же просто, как соотношение $\Delta p \Delta x \approx \hbar$, его все же можно истолковать в том смысле, что энергия не имеет определенного значения в фиксированный момент времени. В пользу последнего утверждения (кроме указаний на подобную трактовку соотношения $\Delta E \Delta t \approx \hbar$, изложенных в ряде распространенных учебников) можно привести несколько аргументов, различных, впрочем, по своему значению.

Самый простой и наглядный аргумент состоит в следующем. Как известно, энергия связана с частотой формулой Планка $E = \hbar\omega$, подобно тому как импульс связан с длиной волны соотношением де Бройля $p = 2\pi \hbar/\lambda$. Так как понятие длины волны по самому своему смыслу относится к определенному интервалу и утверждение о том, что длина волны в данной точке равна какой-либо величине, лишено смысла, то и понятие импульса в точке лишено смысла. Это означает, что между импульсом и координатой существует соотношение неопределенностей. Но, совершенно аналогично, понятие частоты обязательно нужно отнести к некоторому временному интервалу. Выражение «частота в данный момент времени» бессмысленно. Следовательно, бессмысленно и понятие энергии в данный момент времени. Правда, в некоторых работах указывается, что связь энергии, определяемой стационарным уравнением Шредингера, с частотой колебаний лишена физического смысла (см., например, [64]). Однако никаких серьезных аргументов в пользу такой точки зрения не приводится. Напротив, достаточно очевидно, что для фотонов с энергией E понятие частоты $\omega = E/\hbar$ имеет ясный физический смысл.

Следовательно, для них понятие энергии в данный момент времени совершенно бессодержательно.

С л е д у ю щ и й а р г у м е н т . Если система существует конечное время Δt (находится в квазистационарном состоянии), то энергию системы не только нельзя определить с погрешностью, меньшей $\hbar/\Delta t$, но, как указывают Ландау и Лифшиц ([57], стр. 181), она просто не имеет фиксированного значения. Фок и Крылов в цитированной выше статье [65] показали наличие для системы в квазистационарном состоянии функции распределения по энергиям, причем ее вид зависит от закона распада данного состояния. Фактически все дискретные



Рис. 19.

состояния, рассматриваемые в квантовой механике как стационарные, таковыми в действительности не являются, за исключением основного состояния с минимальной энергией. Таким образом, энергия, за исключением энергии основных состояний, не имеет и не может иметь строго определенную величину, для которой точно выполнялся бы закон сохранения на конечном интервале времени.

П о с л е д н и й а р г у м е н т основан на квантовой теории поля. Любая частица, например электрон, непрерывно испускает и поглощает кванты полей, с которыми она взаимодействует. На рис. 19 процесс испускания и поглощения свободным электроном виртуальных фотонов изображен с помощью диаграммы Фейнмана (электрон — сплошная линия, фотоны — пунктирные линии). Здесь, конечно, показаны не все виртуальные процессы, но и изображенного вполне достаточно для наших целей. Из диаграммы видно, что в любой момент времени или на любом интервале времени электрон находится в виртуальном состоянии, причем, как следует из квантовой теории поля, на очень малом интервале времени энергия его может оказаться какой угодно. Поэтому утверждение о том, что частица обладает в определенный момент времени точно фиксированной энергией, не может соответствовать действительности. Лишь в среднем по бесконечному интервалу времени энергия будет вполне

определенной величиной. И сама частица предстает как реальный объект с фиксированными значениями энергии и импульса лишь при усреднении по всевозможным виртуальным процессам. Конечно, на самом деле этот интервал не обязан равняться бесконечности. Из-за малости \hbar квантовые флуктуации энергии на интервале, к примеру, в миллиардную долю секунды уже ничтожны: $\Delta E \approx \hbar/\Delta t \sim 10^{-18}$ эрг, и энергию можно считать вполне определенной величиной.

Теперь несколько слов о том, какие основания побуждают Ландау, Блохинцева и других авторов утверждать,

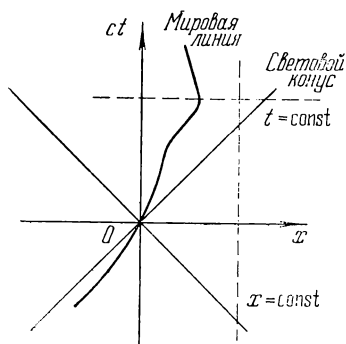


Рис. 20.

что энергия в данный момент времени может иметь определенное значение, а импульс в точке не может. Видимо, дело в следующем. За большой промежуток времени энергию можно измерить точно, не возмущая прибором ее значение. Это бесспорно. Если же состояние стационарно (свободная частица или основное состояние, принадлежащее дискретному спектру), т. е. энергия постоянна, то в

любой момент времени после измерения частица или система будут иметь ту же энергию. Ведь в любой момент времени частица существует и имеет энергию.

С импульсом положение иное. На большом интервале Δx можно точно измерить импульс, не возмущая его значения. Величина импульса в дальнейшем останется неизменной (конечно, у свободной частицы). Но в произвольной точке x частица отнюдь не обязана находиться. В этом состоит, в частности, различие пространственной и временной координат. Сечение четырехмерного пространства гиперповерхностью $t = \text{const}$ обязательно пересечет мировую линию частицы, а сечение гиперповерхностью $x = \text{const}$ совсем не обязательно пересечет ее. Это происходит потому, что время течет только в одном направлении, а координата может как увеличиваться, так и уменьшаться (рис. 20). Из-за данного различия импульс в точке не имеет смысла, а энергия в данный момент времени может его иметь.

Однако такие соображения не очень убедительны. Ведь импульс и координату также можно определить одновременно и сделать это в принципе нетрудно. Допустим, что нам точно известен импульс электрона. Если теперь измерить его координату, то мы будем знать одновременно импульс и координату с большей точностью, чем допускается соотношением неопределенностей. Для момента времени непосредственно перед измерением координаты $\Delta p \Delta x$ меньше обычной границы. «Однако,— пишет Гейзенберг,— это знание прошлого имеет чисто умозрительный характер, так как оно (вследствие изменения импульса при измерении положения) никоим образом не входит как начальные условия в какое-либо вычисление будущей судьбы электрона и вообще не играет роли ни в каком физическом эксперименте. Стоит ли названному вычислению прошлого электрона приписывать какую-либо физическую реальность, является поэтому только делом вкуса» ([66], стр. 21). К сожалению, на это обстоятельство обычно не обращают внимания, хотя ситуация оказывается весьма необычной и даже несколько загадочной. Координату и импульс электрона все же можно определить одновременно и точно, хотя знание этих величин и относится к прошлому. Создается, вопреки обычным высказываниям, впечатление, что они существуют, но только их нельзя использовать в качестве начальных условий.

Сходным образом и энергия, по Ландау и Блохинцеву, имеет в данный момент времени определенное значение. Вот только проверить закон сохранения энергии на интервале Δt с ошибкой, меньшей $\Delta E \approx \hbar/\Delta t$, не представляется возможным.

Все перечисленные трудности исчезают, если истолковывать принцип неопределенностей как факт, относящийся в первую очередь не к возможностям измерений, а к объективным свойствам квантовых объектов. Такого рода толкование в отчетливой форме дано в работах Вассэля [67] и автора настоящей книги ([9, 102]). Сходные мысли высказывались Вулом [68] и другими авторами.

Суть данной интерпретации принципа неопределенностей сводится к следующему. Собственные значения оператора импульса суть средние по бесконечному пространственному интервалу, а не точно фиксированные величины. Аналогично, собственные значения оператора энергии — это средние по времени значения энергии. И

лишь в среднем по бесконечным интервалам указанные величины имеют строго определенные значения, т. е. их дисперсии в состояниях, описываемых собственными функциями соответствующих операторов, равны нулю. На конечных же интервалах ни импульс, ни энергия строго фиксированных значений не имеют. Дисперсии этих величин отличны от нуля и имеют порядок, даваемый соотношением неопределенностей. Таким образом, $\Delta p \approx \hbar/\Delta x$ определяет интенсивность флуктуаций импульса на отрезке Δx , а $\Delta E \approx \hbar/\Delta t$ — разброс энергии на интервале Δt .

Данное толкование соотношения неопределенностей представляется нам необходимым в рамках квантовой теории поля. Вследствие виртуальных процессов излучения и поглощения данной частицей других, ее энергия и импульс не могут оставаться постоянными. Более того, как показано в работе Соколова и Туманова [69], учет взаимодействия классической частицы в параболической потенциальной яме (осциллятор) с полем виртуальных фотонов в точности приводит к соотношению неопределенностей $\Delta p \Delta x \gtrsim \hbar$.

С данной точки зрения многие положения становятся более понятными и даже в известной мере наглядными. Очевидно, например, что квазистационарные состояния не могут иметь определенной энергии, так как энергия имеет фиксированное значение лишь в среднем по бесконечному интервалу времени, а в квазистационарных состояниях система существует конечное время.

Не представляет трудностей и вопрос о соотношении неопределенностей между импульсом и координатой для прошедших моментов времени. Если импульс точно известен, то это означает, что известно среднее значение импульса на большом интервале. Его, например, можно получить, измерив дважды положение электрона и зная время между двумя последовательными измерениями. Но это совсем не означает, что в прошлом импульс имел определенное значение в каждой точке. Он флуктуирует. Свободная частица не имеет постоянного импульса на пройденном ею участке пути. А лишь при постоянном импульсе можно говорить о его определенных мгновенных значениях в предшествующие моменты времени.

Так же обстоит дело и с энергией. Определенное значение энергии в стационарном состоянии совсем не означает, что в любой момент времени она имеет одну и ту

же величину. Лишь в среднем по времени значение энергии вполне определено. Возможность же «точного» измерения энергии в данный момент времени основана на предположении, что в стационарном состоянии энергия остается постоянной во все моменты времени. Но это предположение в принципе нельзя проверить на опыте с погрешностью, меньшей $\hbar/\Delta t$. И уже поэтому можно сомневаться в его справедливости.

Главный аргумент в пользу указанной трактовки состоит в том, что принцип неопределенностей отнюдь не сводится к чисто негативному утверждению о пределах применимости классических понятий координаты, импульса, энергии и т. д. к квантовым объектам. Он служит рабочим инструментом теории, позволяющим очень простым путем делать важные оценки. Как известно, с помощью соотношения $\Delta p \Delta x \gtrsim \hbar$ можно с точностью до коэффициента оценить минимальное значение энергии частицы в осцилляторе, атомах водорода и гелия и т. д. При этом величина $\Delta p \approx \hbar/a$, где a — порядок размеров системы, выступает непосредственно как разброс возможных значений импульса, а $(\Delta p)^2/2m$ — как разброс значений кинетической энергии.

Из принципа неопределенностей вытекает невозможность существования электрона в ядре. При ограничении его движения столь малой областью флуктуации кинетической энергии настолько велики, что никакие силы не способны его там удержать. Юкава с помощью принципа неопределенностей нашел порядок массы π -мезонов — переносчиков ядерных взаимодействий. С равным успехом в этом подсчете можно использовать соотношение неопределенностей импульс — координата или энергия — время.

Если в учебниках по квантовой механике обычно избегают писать о соотношениях $\Delta p \gtrsim \hbar/\Delta x$ и $\Delta E \gtrsim \hbar/\Delta t$ как о разбросах (или флуктуациях) соответствующих величин, то физики на своем деловом языке давно так говорят. Это можно обнаружить, например, в «Фейнмановских лекциях по физике». «Разброс в импульсах, в соответствии с соотношением неопределенностей, — пишет Фейнман, — должен быть равен примерно \hbar/a » [70]. И далее Фейнман разъясняет с помощью принципа неопределенностей, почему мы можем ходить, не проваливаясь сквозь пол. Ноги давят на пол и слегка сминают его атомы. Электроны вынуждены тесниться в

меньшем объеме, и по принципу неопределенностей их импульсы, а значит, и энергия в среднем увеличиваются. Возрастает интенсивность электронных толчков о подошвы ног, и мы благополучно остаемся на поверхности пола.

Вернемся теперь к законам сохранения энергии и импульса. Как отмечалось выше, на малых пространственно-временных интервалах ни импульс, ни энергия не имеют строго определенных значений, и поэтому нельзя говорить о строгом выполнении этих законов на малых интервалах. Нельзя, разумеется, и утверждать, что они нарушаются, так как сами величины импульса и энергии не фиксированы. Нарушение безусловно имело бы место, если бы последние принимали строго определенные значения в данный момент в данной точке.

Итак, законы сохранения импульса и энергии строго выполняются для статистических средних и на достаточно больших пространственно-временных интервалах. Следовательно, законы сохранения важнейших механических величин имеют не динамический, а статистический характер. Точнее, динамический характер эти законы приобретают только на больших интервалах.

Нужно заметить, что статистический характер законов сохранения механических величин на малых интервалах совсем не означает сотворения энергии, импульса и др. из ничего или же, напротив, их исчезновения. Его следует рассматривать как результат обмена энергией, импульсом и т. д. частицы с «окружающей средой», каковой является физический вакуум. Но проследить детально за течением этого обмена не представляется возможным.

Все сказанное ранее относится и к закону сохранения момента импульса. Операторы проекций момента на оси координат не коммутируют с соответствующими углами поворота. Так, $\hat{M}_z \varphi - \varphi \hat{M}_z \neq 0$, где \hat{M}_z — оператор проекции на ось z , а φ — угол поворота в плоскости xy , перпендикулярной z . Соответственно справедливо соотношение неопределенностей $\Delta M_z \Delta \varphi \gtrsim \hbar$, и, значит, фиксированное значение имеет только компонента M_z , усредненная по всей области изменения угла φ от 0 до 2π . И закон сохранения момента импульса выполняется для этих усредненных значений. Подобное усреднение в эксперименте достигается, например, при прецессии вектора момента импульса вокруг направления магнитного поля. Подробнее об этом мы поговорим в дальнейшем.

Если обратиться теперь к законам сохранения таких величин, как изотопический спин, странность и четность, то фактически их следует считать «законами сохранения» в кавычках. Слабые взаимодействия меняют эти величины, а изотопический спин изменяется и при электромагнитных взаимодействиях. Реально, в эксперименте, эти величины не сохраняются. Просто процессы, сопровождающиеся их изменением, маловероятны и для их наблюдения требуются значительные по микроскопическим масштабам промежутки времени.

Существует лишь три закона сохранения, которые выполняются абсолютно строго, однозначно, а именно законы сохранения электрического, барионного и лептонного зарядов *). Почему именно они выполняются абсолютно точно, мы сейчас не знаем. Но, разумеется, делать отсюда вывод о более фундаментальной роли динамических законов по сравнению со статистическими нельзя. Эти законы сохранения являются лишь динамическими элементами, вообще говоря, статистической теории.

§ 4. Статистическая природа фундаментальных физических закономерностей и специальная теория относительности

Основная цель нашего исследования заключается в доказательстве того, что наиболее глубокие фундаментальные физические теории имеют статистический характер, а динамические теории, описывающие тот же круг явлений, суть первое приближение к действительности.

Наряду с теориями, описывающими определенный круг явлений, существуют более общие принципы, пронизывающие всю физику. К ним относятся, как уже говорилось, вариационные принципы и законы сохранения. Сюда же можно отнести специальную теорию относительности, формулирующую общие физические представления о пространстве и времени.

Как было показано, вариационный принцип в его наиболее общей форме — принцип Гамильтона — и основные законы сохранения (кроме законов сохранения электрического, барионного и лептонного зарядов)

*) Точнее, двух лептонных зарядов: электронного лептонного заряда и мюонного лептонного заряда.

имеют статистическую природу. Но современные представления о пространстве и времени, выражаемые преобразованиями Лоренца, носят явно динамический характер.

Конечно, допуская примат статистической формы закономерностей, этот факт можно объяснить довольно просто. В самом деле, требование релятивистской инвариантности в равной степени относится и к динамическим и к статистическим закономерностям.

Благодаря тому, что такие статистические, в общем, теории, как релятивистская квантовая механика, релятивистская статистика, инвариантны относительно преобразований Лоренца, мы в принципе имеем право рассматривать динамический характер этих представлений как проявление еще одного динамического элемента в статистических теориях. Таким выводом можно было бы удовлетвориться.

Однако в действительности, видимо, дело обстоит не так просто. Динамический характер соотношений теории относительности, возможно, несет ответственность за те трудности, с которыми сейчас встречается квантовая теория поля. Очень отчетливо суть дела поясняет Гейзенберг. «С первого взгляда кажется,— пишет Гейзенберг,— будто две теории, квантовая и теория относительности, относятся к столь различным сторонам природы, что практически они никак не могут влиять друг на друга, и что поэтому требования обеих теорий должны быть легко выполнены в одном и том же формализме. Но более точное исследование показало, что обе эти теории вступают в определенном пункте в конфликт, в результате чего и происходят все дальнейшие трудности» ([71], стр. 132). «Структура пространства и времени, выраженная специальной теорией относительности, создает совершенно резкую границу между областью одновременности, в которой не может быть передано никакое воздействие, и другими областями, в которых непосредственное воздействие одного процесса на другой может иметь место.

С другой стороны, соотношение неопределенностей квантовой теории устанавливает жесткую границу точности, с которой могут быть одновременно измерены координаты и импульсы или моменты времени и энергии *).

*) Отметим, что и Гейзенберг считает невозможным одновременную фиксацию энергии и момента времени.

Так как совершенно резкая граница означает бесконечную точность фиксации положения в пространстве и времени, то соответствующие импульсы и энергии должны быть полностью неопределенными, т. е. с совершенно подавляющей вероятностью должны выступать на первый план даже процессы со сколь угодно большими импульсами и энергиями. Поэтому всякая теория, которая одновременно выполняет требования специальной теории относительности и квантовой теории, ведет, оказывается, к математическим противоречиям, а именно к расхождением в области очень больших энергий и импульсов. Эти выводы не обязательно могут носить необходимый характер, так как всякий формализм рассмотренного здесь рода является ведь очень сложным, и возможно еще, что будут найдены математические средства, которые помогут устранить в этом пункте противоречие между теорией относительности и квантовой теорией. Но до сих пор все-таки все математические схемы, которые были исследованы, приводили в самом деле к таким расхождениям, т.е. к математическим противоречиям, или же они оказывались недостаточными, чтобы удовлетворить всем требованиям обеих теорий. Кроме того, было очевидно, что трудности в самом деле проистекают из только что рассмотренного пункта» ([71], стр. 133, 134). На наш взгляд, с этим мнением Гейзенберга можно целиком согласиться. И не окажется ли возможным полное согласование квантовой теории и теории относительности лишь при статистической формулировке последней? Именно это, может быть, позволит сгладить те жесткие ограничения на фиксацию положения в пространстве и времени, которые требуются теорией относительности и которые вступают в противоречие с принципом неопределенностей в квантовой механике.

Сходной точки зрения придерживается Терлецкий. Он подчеркивает, что теория относительности является «по существу макроскопической теорией (т. е. теорией для статистических средних от микроскопических величин)...». По его мнению, «необходимо прежде всего проанализировать, в какой мере требования, предъявляемые теорией относительности к законам, управляющим статистическими средними (т.е. к макрозаконам), обязательны для микромира, иначе говоря, надо критически пересмотреть теорию относительности

с точки зрения последовательной статистической физики. Только после этого возможно строить единую теорию, удовлетворяющую как требованиям квантовой механики, так и положениям теории относительности при переходе в макрообласть» ([6], стр. 5 и 6).

Таким образом, имеются некоторые основания считать, что теория пространства — времени, приспособленная для описания микроскопических процессов, в конце концов должна быть статистической, как и другие фундаментальные теории и принципы.

До сих пор все усилия были направлены главным образом на то, чтобы, не затрагивая существующих представлений о пространстве и времени, сделать квантовую механику релятивистски инвариантной. Эти усилия дали целый ряд ценнейших результатов, но законченной теории, лишенной противоречий, создать не удалось. В связи с этим представляется заманчивым использовать противоположный подход: попытаться дать квантовое (и соответственно статистическое) описание пространства — времени. Подобного рода попытки имеются; укажем, например, на работы Широкова [72, 73].

В этих работах выбор систем координат описывается специальным оператором, что делает возможным существование состояний с неопределенной системой координат. Дело в том, что при квантовом подходе измерения расстояний и промежутков времени должны, в соответствии с принципом неопределенности, изменять состояние изучаемой физической системы. Невозможность нарушения соотношения неопределенностей должна обеспечиваться соответствующими перестановочными соотношениями. Однако автор замечает, что «приведенные соображения о необходимости учета неопределенных систем координат, по-видимому, существуют только в общей теории относительности. Действительно, если не учитывать гравитационных свойств материи, то мы можем считать, что четырехмерное пространство заполнено не взаимодействующими с исследуемыми частицами часами и масштабами, достаточно тяжелыми и достаточно компактными, чтобы сделать возможными измерения достаточно малых длин и промежутков времени.

В теории с учетом гравитации такое допущение невозможно, поскольку гравитационным взаимодействием должны обладать все без исключения виды материи.

Поскольку гравитационные эффекты начинают сказываться на расстояниях, на много (более, чем на десять) порядков меньших тех, которые доступны для изучения на существующих ускорителях, то в настоящее время можно работать в псевдоевклидовом пространстве с фиксированной системой координат» ([73], стр. 71). Нам последнее замечание не кажется особенно убедительным, поскольку, согласно теории, виртуальные процессы могут протекать на сколь угодно малых пространственно-временных интервалах и именно за счет этих процессов появляются бесконечности, ибо энергии и импульсы виртуальных частиц оказываются сколь угодно большими. Исключение их, возможно, требует уже сейчас изменения трактовки пространственно-временных соотношений.

Итак, резюмируя, можно сказать, что, хотя к настоящему времени вопрос об описании пространственно-временных соотношений в микромире остается неясным, имеются определенные указания на необходимость статистического подхода и в данной области. Теория при этом получается очень сложной, и до сих пор данная идея не разработана до конца (см. также [74]).

§ 5. Особая форма статистических корреляций в квантовой механике и законы сохранения

В исследовании, посвященном значению статистических закономерностей и их свойствам, уместно остановиться на одной замечательной особенности квантовой механики системы частиц. Эта особенность подчеркивается в «парадоксе Эйнштейна, Розена и Подольского», породившем оживленную дискуссию, продолжавшуюся несколько десятков лет, да и сейчас еще не оконченную. Обсуждение «парадокса», интересное само по себе, позволяет еще раз подтвердить и углубить нашу точку зрения на законы сохранения механических величин, соотношение неопределенностей и смысл физических величин в квантовой механике.

В своей работе «Квантовомеханическое описание физической реальности» [75] авторы ставят вопрос о полноте квантовомеханического описания физической реальности. В основу своих рассуждений они положили критерий того, что следует понимать под физической реальностью. «Если мы можем без какого-либо возму-

щения системы предсказать с достоверностью (т. е. с вероятностью, равной единице) значение некоторой величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий данной величине». На конкретном примере они показали, что как величину импульса электрона, так и его координату можно точно предсказать без какого-либо возмущения системы (электрона). Вкратце суть их примера состояла в следующем. Пусть две частицы взаимодействовали от момента $t = 0$ до момента $t = T$. При $t > T$ частицы уже не взаимодействуют. Волновая функция системы после окончания взаимодействия выбирается в следующей форме:

$$\Psi(q_1, q_2) = C\delta(q_1 - q_2 + a), \quad (1)$$

где δ — дельта-функция Дирака, C — нормировочная постоянная. Данная волновая функция описывает состояние системы с определенной разностью координат частиц $q_2 - q_1 = a$ и определенным суммарным импульсом $p_1 + p_2 = 0$.

Измеряя координату q_2 , мы тем самым, не возмущая состояния первой частицы, находим ее координату q_1 , а измеряя импульс p_2 , находим импульс p_1 , не воздействуя на первую частицу. По выдвинутому ранее критерию физической реальности как q_1 , так и p_1 физически реальны. Следовательно, квантовая механика, по Эйнштейну, не полна, так как состояния с определенными значениями q и p одновременно не описываются ею.

Против точки зрения Эйнштейна немедленно выступил Бор [76]. Он обратил внимание на то, что приведенный в статье Эйнштейна с соавторами критерий физической реальности содержит элемент двусмысленности в словах «без какого-либо возмущения системы». Природа физической реальности, по Бору, такова, что определение q (или p) одной частицы оказывает возмущение на условия, позволяющие определить q (или соответственно p) другой частицы.

Бор предложил экспериментальную установку, позволяющую реализовать состояние частиц в рассматриваемом Эйнштейном примере. Частица проходит сквозь щель в свободно подвешенной диафрагме с точно известной и равной нулю начальной компонентой импульса в направлении самой диафрагмы. Равен нулю и начальный импульс частицы в том же направлении. Тогда мы, говорит Бор, имеем свободный выбор между двумя

возможностями и можем узнать либо конечное значение импульса частицы, либо ее начальное положение по отношению к прибору. В первом случае достаточно измерить импульс диафрагмы после прохождения частицы, во втором — положение диафрагмы в момент прохождения частицы через щель, жестко связав диафрагму, например, с подставкой. Тем самым мы лишаем себя возможности измерить импульс частицы.

По Бору, дело здесь не в неполноте описания, а в рациональном разграничении экспериментальных установок. При работе с каждой установкой приходится отказаться от одной из двух дополнительных сторон описания. Никакие сравнения и аналогии с классической физикой не могут передать существа вопроса. Дело не только в незнании некоторых величин, но и в невозможности дать им однозначное определение в силу отсутствия резкого разграничения между поведением самих объектов и их взаимодействием с измерительными приборами.

Если бы мы имели возможность, зная координату щели, одновременно учесть переданный ей частицей импульс, то мы узнали бы направление движения частицы после диафрагмы и могли бы указать, в частности, через какую щель дифракционной решетки, установленной за диафрагмой, пройдет частица. Но это невозможно, так как вероятность обнаружения частицы за решеткой определяется расположением всех щелей, а не наличием одной из них.

Приблизительно те же доводы были повторены Бором много лет спустя в статье «Дискуссия с Эйнштейном о проблемах теории познания» [77].

Несомненно, Бор прав, утверждая, что квантовомеханическое описание является полным. Однако аргументация Бора многим исследователям показалась недостаточной.

Бор рассуждал так, как если бы координаты и импульсы частицы одновременно имели определенные значения, но только в силу принципиально неконтролируемого взаимодействия объекта с прибором найти их невозможно. Он не пытается выяснить, с чем связано и в чем состоит физическое различие между понятиями импульса, энергии и т. д., с которыми мы оперируем в микромире, и теми же величинами в классической механике. Бор отмечает только одну сторону ситуации.

Координаты и импульсы электрона, выступающие в эксперименте, трактуются им как классические. Их квантовая сущность проявляется в одном — в дополнителности. В одних экспериментах выступает одна классическая сторона объекта, в других — другая, но никогда они не выступают обе одновременно.

Бор просто отказывается говорить о свойствах микрообъектов, не взаимодействующих с определенными измерительными приборами, и не дает никакого ответа на вопрос: имеет ли электрон фиксированный импульс или энергию до измерения? В связи с этим уместно, может быть, говорить о неполноте интерпретации квантовой механики копенгагенской школой.

Электрон в интерпретации Бора ведет себя подобно героям многих рассказов Хемингуэя. У Хемингуэя люди часто приходят неизвестно откуда и затем опять уходят в неизвестность, как бы переставая существовать. Только отдельные узловые моменты их жизни ярко освещены талантом писателя. Точно так же и у Бора электрон как бы возникает из небытия в экспериментальной установке, и только здесь его поведение изображается с возможной полнотой. Затем он уходит и как бы перестает существовать до взаимодействия со следующей экспериментальной установкой.

В споре с Эйнштейном Бор только доказал, что в рамках квантовой механики анализ измерительной процедуры показывает невозможность нахождения импульса электрона одновременно с координатой и в случае, рассмотренном Эйнштейном. Но он не доказал, что у электрона объективно нет определенного импульса в точке. Поэтому он фактически не опроверг точку зрения Эйнштейна и целесообразность его критерия физической реальности. Эйнштейн до конца жизни оставался при своем первоначальном мнении (см. [78], [79]).

Недостаточность аргументации Бора пробудила Мандельштама, Блохинцева, Фока, Александрова, Бома и др. принять участие в дискуссии поставленной Эйнштейном проблемы. К обсуждению их работ мы сейчас и перейдем.

Мандельштам в «Лекциях по основам квантовой механики» ([80], стр. 347) дал строгое решение задачи о прохождении электрона (система II) сквозь неподвижную диафрагму со щелью (система I), которая может смещаться только в одном направлении. Этот случай

качественно был рассмотрен Бором. Решение стационарного уравнения Шредингера для системы электрон — диафрагма имеет вид

$$\Psi(q_1, q_2, q_3) = \frac{1}{2\pi\hbar} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[\frac{i}{\hbar} \left(pq_2 - pq_1 + \sqrt{2mE - \frac{m}{M} p^2 - p^2 \cdot q_3} \right) \right] dp, \quad (2)$$

где q_1 — координата диафрагмы, q_2, q_3 — координаты электрона вдоль диафрагмы и перпендикулярно к ней, M и m — массы диафрагмы и частицы, E — их полная энергия. При $q_3 = 0$ выражение (2) переходит в (1), если положить $a = 0$. Суммарный импульс электрона и диафрагмы в направлении q_2 равен нулю при любых q_3 .

Сущность точки зрения Мандельштама состоит в следующем. При измерении различных величин, относящихся к электрону, мы выделяем из исходной совокупности пар электрон — диафрагма различные подсовкупности. В каждой подсовкупности справедлив принцип неопределенностей. «Но одновременные точные значения импульса и координаты в различных подсовкупностях вполне допустимы, и никакого противоречия с волновой механикой нет» ([80], стр. 388). По мнению Мандельштама, Эйнштейн не прав, когда утверждает, что мы проводим измерения над системой II, не затрагивая систему I. «Спрашивается, откуда система II получила свой импульс? От столкновения с системой I. Значит, если мы берем только те случаи, когда система II обладает некоторым определенным импульсом, то мы берем, тем самым, лишь определенные удары со стороны системы I. Если же у системы II определенная координата, то она получила от системы I другие удары, или, точнее, удары, полученные ею от системы I, не являются определенными» ([80], стр. 389). Не вполне понятным образом вся проблема представляется Мандельштаму тривиальной.

Блохинцев в своем известном курсе квантовой механики присоединяется к точке зрения Мандельштама на существо проблемы ([58], стр. 551). Все трудности, по его мнению, связаны с забвением статистического характера квантовой механики. Забывают, что состояние частицы в квантовой механике характеризуется не «само по себе», а принадлежностью к тому или другому

ансамблю, которая имеет совершенно объективный характер и не зависит от сведений наблюдателя.

Против данного решения «парадокса» можно выдвинуть следующие возражения. Авторы цитированных выше работ полагают, что измерения производятся после прекращения взаимодействия электрона с диафрагмой. Поэтому выбор того или иного измерительного прибора не должен влиять на характер взаимодействия систем. Но если это так, то мы можем произвольно отнести систему I к тому или другому подансамблю, никак не воздействуя на нее. Все определяется произвольным выбором между измерением импульса системы II или измерением ее координаты. Принадлежность системы к тому или иному ансамблю теряет объективное содержание и определяется сведениями наблюдателя. Вместе с тем и вся проблема оказывается в первоначальном состоянии.

Таким образом, как справедливо отметил Александров, здесь аргументация фактически соответствует точке зрения Бора, с тем лишь различием, что вместо единичных опытов рассматривается их совокупность [81].

Соображения о корреляциях классического типа между системами ничего не объясняют. Привлечение концепции ансамблей здесь, как, впрочем, и в других случаях, не вносит ясности в интерпретацию квантовой механики.

Бом рассматривал мысленный эксперимент Эйнштейна, Подольского и Розена на основе представлений о так называемых «скрытых параметрах» [82]. Согласно развиваемой им концепции состоянию (1) отвечает случай, когда обе частицы покоятся, а их координаты образуют статистический ансамбль, в котором $q_2 - q_1 = a$. Изменение состояния одной частицы при измерении, проведенном над второй частицей, происходит, по Бому, за счет взаимодействия частиц посредством гипотетических «квантовомеханических сил». Воздействие при измерении на одну из частиц неконтролируемым образом изменяет эти силы и соответственно изменяет состояние второй частицы, причем взаимодействие частиц распространяется мгновенно.

Останавливаться на критике данной точки зрения вряд ли целесообразно. С одной стороны, вся интерпретация квантовой механики Бомом почти несомненно несостоятельна, а с другой стороны, в настоящее время, по-видимому, и сам Бом отказался от приведенного выше

решения проблемы. Как отмечается в статье «Обсуждение экспериментального доказательства парадокса Эйнштейна, Подольского и Розена» [83], в опытах Ву [84] по рассеянию фотонов аннигиляции впервые экспериментально доказано, что парадоксальные в рамках классической физики особенности квантовой механики, подчеркнутые Эйнштейном, правильно отражают свойства микрообъектов. Пути объяснения этих особенностей следует искать, по мнению Бома, в теории «субквантового уровня», необходимость построения которой обосновывается в цитированной ранее книге [1]. Однако ссылки на работу, опубликованную в сборнике «Вопросы причинности в квантовой механике», Бом не дает, а в книге [1] упоминание о «парадоксе» Эйнштейна вообще отсутствует.

Еще одна точка зрения на обсуждаемую проблему была выдвинута Александровым (см. [81]) и Фоком [85].

По их мнению, в случае, рассмотренном Эйнштейном и другими, между пространственно отдаленными частицами существует реальное взаимодействие, что отражается в наличии общей волновой функции, описывающей их состояние. Именно последнее обстоятельство приводит к изменению состояния одной из частиц при воздействии на другую тем или иным измерительным прибором. Ошибка авторов (Эйнштейн, Подольский, Розен, Бор, Мандельштам, Блохинцев), обсуждавших этот вопрос, в том, что они предполагали отсутствие всякого взаимодействия между пространственно разделенными объектами с общей волновой функцией.

Связь частиц, имеющих общую волновую функцию, отлична от механической, силовой связи. Александров называет ее «особой формой связи в зависимости от условий». Тем не менее это реальная, объективно существующая связь, а не «телепатия», как называл подобные связи Эйнштейн.

Что же все-таки это за взаимодействие? Авторы ограничиваются приведением примеров несиловых взаимодействий. Гибель подчиненных меняет состояние начальника просто потому, что он перестает быть фактически начальником, хотя остается целым и невредимым; эффект телеграммы не стоит ни в какой связи с затраченной на ее передачу энергией; наконец, самый важный тип несиловых взаимодействий — взаимодействия, выражаемые принципом Паули.

Надо сказать, что данная точка зрения по меньшей мере нуждается в более развернутом, более конкретном изложении. Считается, что при воздействии на одну частицу меняется не наша информация о возможном поведении другой частицы, а само ее объективное состояние, причем изменение состояния второй частицы не связано с наличием каких-либо полей. Связь ведь несиловая. «Новый тип взаимодействия» обладает многими удивительными свойствами: он осуществляется мгновенно при любых расстояниях (увеличение расстояния не ослабляет взаимодействия!) и после измерения над одной частицей бесследно исчезает. Для его восстановления необходимо силовое взаимодействие. Все это напоминает концепцию Бомы, с той разницей, что Бом относит данное взаимодействие на счет поразительных свойств специфического «квантовомеханического поля», а по Фоку — Александрову оно осуществляется без каких-либо промежуточных агентов. Называть этот тип взаимодействия «телепатией» или объективно существующей «связью в зависимости от условий», — по нашему мнению, дело вкуса*).

Можно по-иному [86] подойти к проблеме, поставленной Эйнштейном. Для этого нужно дать принципу неопределенностей то толкование, о котором шла речь выше (см. § 3 данной главы). Кроме того, в излагаемой ниже аргументации по-новому трактуются понятия «потенциально возможного» и «действительного», существенные при интерпретации квантовой механики. На это

*) Если признать объективно существующей «связь в зависимости от условий», то можно смело строить теорию телепатии, рассматривая ее как реальный факт. В самом деле, в начальный момент индуктор и реципиент взаимодействуют друг с другом обычным силовым способом. Скажем, просто беседуют. При этом состояние клеток их больших полушарий (или части этих клеток) будет описываться общей волновой функцией (подсистема не имеет своей волновой функции). Затем реципиент уезжает в другой город. Но состояние части клеток головного мозга реципиента и индуктора по-прежнему характеризуется одной волновой функцией (допустим, что в мозгу есть такие участки, состояние которых обычные внешние силовые воздействия могут не разрушать). Индуктору в специальном опыте показывают игрушечную кошечку. В результате состояние его мозга изменяется и за счет несилового взаимодействия мгновенно меняется состояние мозга реципиента. Он узнает, что его партнеру показали именно кошечку, и описывает ее внешний вид. Данная «теория» является единственной, которая объясняет якобы существующий опытный факт: телепатический эффект не зависит от расстояния между индуктором и реципиентом.

обстоятельство обращают внимание Гейзенберг [87] и Фок [88].

Только волновая функция типа (1) позволяет определить q_1 или p_1 по измеренным q_2 или p_2 . Но эта функция описывает состояние двух частиц в любой момент времени лишь в том случае, если частицы либо вообще жестко связаны друг с другом, либо при наличии связи между ними в некоторой плоскости, содержащей q_1 и q_2 . В последнем случае, рассмотренном Мандельштамом, волновую функцию вида (1) можно использовать только при $q_3 = 0$.

Если имеется существующая все время жесткая связь, то никакого парадокса в том, что измерение координаты одной частицы меняет импульс другой, конечно, нет. У Эйнштейна речь идет о невзаимодействующих частицах. Но тогда δ -образный двумерный волновой пакет будет, в соответствии с законами квантовой механики, расплываться. В нерелятивистском приближении скорость его расплывания бесконечна. Спустя сколь угодно малое время он займет все пространство. Если в начальный момент пакет несколько размазан, то расплывание будет происходить с конечной скоростью. Следовательно, только в начальный момент между q_1 и q_2 в примере Эйнштейна имеется однозначная связь. В любой следующий момент мы уже вообще не сможем найти координату q_1 при известном значении q_2 (для δ -образного пакета) или (для размазанного пакета) сможем найти лишь ту или иную вероятность определенной координаты q_1 после измерения q_2 . При $t \rightarrow \infty$ во всех случаях состояние изменится настолько, что при известном q_2 все значения q_1 станут равновероятными.

С другой стороны, в начальный момент мы не в состоянии точно определить импульс p_2 . Для точного его измерения необходимо, в соответствии с принципом неопределенностей, определить его на неограниченно большом отрезке Δq_2 . Вернее, измерить его можно и на малом отрезке, но полученное значение p_2 не позволит найти точное значение p_1 . Дело в том, что определение импульса приобретает точный смысл (наличие закона сохранения) только в среднем на неограниченно большом интервале. Импульс, передаваемый макроскопической системе (прибору) на отрезке Δq , имеет разброс порядка $\hbar/\Delta q$. Следовательно, получить

имеющее смысл (сохраняющееся) значение импульса p_2 и определить по нему p_1 можно только на больших интервалах. Но, найдя это значение p_2 , мы уже не обнаружим однозначной связи координат q_1 и q_2 . Пакет за это время расплывется *).

Итак, измеряя q_2 или p_2 , мы фактически не воздействуем на первую частицу. Но состояние системы непрерывно изменяется. В начальный момент объективно существует корреляция между координатами, а по прошествии большого промежутка времени мы можем говорить о корреляции между импульсами. Корреляция между координатами к этому моменту будет утрачена. Точнее, следует сказать так: *в начальный момент корреляция импульсов (в смысле закона сохранения) существует как «потенциальная возможность», которая в данный момент времени не может перейти в «действительность»*. Лишь по прошествии большого интервала времени она из потенциально возможной переходит в действительную. Если измерить импульсы обеих частиц, заставляя их взаимодействовать с некоторой макроскопической системой, то мы обнаружим эту корреляцию как действительно существующую.

Аналогичные рассуждения можно провести в случае, когда волновая функция не зависит от времени, но между системами имеется жесткая связь в определенной плоскости (пример Бора — Мандельштама). В соответствии с волновой функцией (2) можно найти точное значение координаты диафрагмы q_1 только при измерении координаты частицы q_2 в плоскости диафрагмы ($q_3 = 0$). При $q_3 \rightarrow \infty$ корреляция координат исчезает. Напротив, точное значение импульса частицы p_2 , а значит и импульса диафрагмы p_1 , по причинам, о которых было сказано выше, можно найти только тогда, когда частица бесконечно далеко уйдет от диафрагмы. В плоскости диафрагмы существует корреляция координат, а корреляция импульсов в форме действительного отсутствует. По мере удаления от диафрагмы корреляция координат постепенно утрачивается, а корреляция импульсов из потенциально возможной превращается в действительную.

Особенно наглядно ситуация в квантовой механике, рассматриваемая Эйнштейном, Подольским и Розеном,

*) Заметим, что Бор также говорит об определении либо начальной координаты, либо конечного импульса.

выступает в примере, приведенном Бомом в книге [60] (стр. 702). Эта книга была написана еще до того, как Бом отказался от обычной интерпретации квантовой механики и попытался рассматривать координаты и импульсы микрообъектов как скрытые параметры. В ней еще можно найти параграф «Доказательство несовместимости квантовой теории с понятием скрытых параметров» ([60], стр. 712).

Рассмотрим молекулу, состоящую из двух атомов, в состоянии, в котором ее спин равен нулю. Пусть каждый из атомов обладает полуцелым спином $1/2 \hbar$. Тогда в молекуле спины атомов ориентированы антипараллельно. Далее, предположим, что молекула расщепляется в результате некоторого воздействия, не меняющего момента импульса молекулы, после чего атомы расходятся на большое расстояние и перестают взаимодействовать друг с другом. Проекция спина каждого атома на любое заданное направление, очевидно, неопределенна. Но если мы измерим проекцию спина атома 1 на некоторое направление z и получим значение, к примеру, $+1/2 \hbar$, то проекция спина атома 2 на то же направление сразу же станет определенной и равной $-1/2 \hbar$ в силу закона сохранения импульса. Но до измерения эта проекция для атома 2 не была определенной. Причем после измерения проекции спина атома 1 на ось z проекция спина атома 2 на другое направление (например, x) остается неопределенной и найти ее без прямого измерения уже принципиально невозможно. В противном случае было бы нарушено соотношение неопределенностей между проекциями момента импульса на различные оси координат. Налицо парадоксальная в рамках обычных классических представлений ситуация.

Наша точка зрения, которая довольно близка к развиваемой Бомом в цитированной выше книге, такова. До измерения частице с полуцелым спином (атом 1) нельзя приписать никакой определенной проекции на то или иное направление, подобно тому как электрон не имеет какого-либо определенного импульса сразу после прохождения диафрагмы в разобранный ранее примере. Лишь после усреднения момента импульса по азимутальному углу в системе отсчета, полярная ось которой ориентирована определенным образом (например, в направлении магнитного поля измерительной установки), из двух потенциально возможных значений

проекция момента одно становится действительным (в нашем примере $+\frac{1}{2}\hbar$). При этом со вторым атомом объективно не происходит ничего. Но если заставить его взаимодействовать с измерительной установкой (с тем же направлением магнитного поля), то из двух потенциально возможных значений проекции реализуется (перейдет в форму действительного) одно. Именно, проекция спина окажется равной $-\frac{1}{2}\hbar$ в силу корреляции между потенциально возможными значениями момента импульса, обусловленной законом сохранения момента импульса. Но этот закон выполняется в среднем по углу. В общих чертах интерпретация данного опыта остается той же, что и при измерении координат и импульсов. Обнаруживается лишь некоторая специфика, связанная со свойствами данной физической величины — момента импульса.

Таким образом, Бор совершенно правильно настаивал на полноте описания физической реальности квантовой механикой. Однако критерий реальности Эйнштейна не содержит отмеченной Бором двусмысленности. Если можно однозначно предсказать значение некоторой величины, не воздействуя на систему, то существует элемент физической реальности, ей соответствующий. Все дело в том, что импульс в точке не является определенной физической величиной и никакого элемента реальности ему сопоставить нельзя. Аналогично, проекция спина на какое-либо направление не имеет определенной величины, если не существует условий, объективно выделяющих данное направление среди прочих (например, магнитного поля вдоль данного направления).

Как нам представляется, изложенное выше толкование «парадокса» Эйнштейна соприкасается с позицией Мандельштама, развиваемой Блохинцевым, а также с представлениями Фока и Александрова. В соответствии с точкой зрения Мандельштама центр тяжести перенесен на корреляции, возникающие во время взаимодействия систем. Однако корреляции нельзя толковать слишком прямолинейно в классическом духе, как это может показаться при знакомстве с работами упомянутых авторов.

Наличие потенциально возможных корреляций, переходящих в действительные при определенных условиях, вероятно, тоже можно назвать «особым типом связи в зависимости от условий».

В заключение еще раз сформулируем нашу точку зрения. *Наличие общей волновой функции у пространственно разделенных систем свидетельствует о существовании потенциально возможных корреляций между соответствующими физическими величинами. При определенных условиях такие корреляции становятся действительными.*

§ 6. Причинность в динамических и статистических законах

События или явления в окружающем нас мире непрерывной чередой сменяют друг друга. Любое событие порождается предшествующими и в свою очередь порождает последующие. Существование такой связи явлений во времени называется обычно причинностью.

Однако что же понимать под наступлением определенного события? До создания количественной теории, объясняющей различные явления фундаментальными законами, до создания механики Ньютона, на этот вопрос не было дано, да и нельзя было дать, ясного однозначного ответа, допускающего строгую математическую формулировку. Механика же Ньютона дала на него впервые вполне определенный ответ.

Если в данный момент времени точно известны координаты и импульсы всех частиц системы, то, согласно классической механике, однозначно определено ее состояние. Все процессы в мире сводятся к переходу систем частиц из одного состояния в другое, и наступление данного события — это приход системы в состояние с данными значениями координат и импульсов частиц, и ничего больше. Зная характер зависимости сил взаимодействия от координат, можно с помощью уравнений движения классической механики по состоянию системы в начальный момент времени определить однозначно ее состояние в любой последующий момент. Поэтому состояние механической системы в начальный момент времени (набор ее импульсов и координат), наряду с известным законом взаимодействия частиц, может рассматриваться как причина, а состояние в последующий момент — как следствие. В этом суть представлений о *динамической, или, однозначной, причинности* в классической физике, суть классического детерминизма.

Понятие причинности, сформулированное в начале параграфа, существенно отличается от того, которое возникло в физике в связи с развитием механики. Фактически речь идет о понятиях причинности на разных уровнях.

Очень хорошо, по нашему мнению, вскрыт и обоснован вопрос о двух уровнях причинности Баженовым ([42], стр. 208). Первоначально понятие причинности возникло в связи с практической деятельностью людей, и для него характерны три признака: 1) временное предшествование причины следствию; 2) одна и та же причина всегда обуславливает одно и то же следствие; 3) причина — активный агент, производящий следствие.

По Баженову, совокупность всех трех признаков характеризует причинность, которую он называет *наглядной*. Это простейшая форма причинности. «Она достаточна сама по себе только на уровне познания единичных явлений и их связей друг с другом. Пока мы исследуем отдельные события, ставя вопрос, от чего они зависят и почему существуют, мы имеем некоторые более или менее конкретные факторы, которые вызывают, производят эти события» ([42], стр. 211). Здесь, можно сказать, причинность лишь качественно характеризует связь явлений. Именно поэтому, на наш взгляд, более целесообразно данную форму причинности называть не наглядной, а *качественной*, с тем чтобы подчеркнуть отличие ее от той формы причинности, в какой она выступает в количественных физических теориях, когда состояние можно определить строго математически.

«В развитых научных дисциплинах, достигших высокой степени использования математического аппарата и дающих открываемым закономерностям математическую формулировку, под причинностью прежде всего понимается связь состояний во времени, такая, что на основе знания предшествующего состояния системы можно предсказать ее последующие состояния. Именно в таком смысле фактически и говорит о причинности физик» ([42]), стр. 211). Такую форму причинности Баженов называет *теоретической*, хотя здесь, быть может, более уместен термин *причинность в физике* (ибо ни в какой другой науке мы не имеем точно формулируемого понятия состояния), или *количественная причинность*.

Теперь перейдем к обсуждению причинности в динамических и статистических законах. Сформулированная на основе механики Ньютона однозначная причинность характерна для динамических закономерностей любого вида. В частности, открытие Максвеллом системы уравнений для электромагнитного поля ни в малейшей степени не изменило представления об однозначной причинности. Как и механика Ньютона, теория Максвелла позволяет по точно фиксированным значениям величин (напряженностей электрического и магнитного полей) в начальный момент времени однозначно найти их в последующие моменты. Новые величины определяют состояние системы (поля вместо координат и импульсов), но в остальном все остается по-старому. (Мы не будем касаться существенного самого по себе для причинности факта — конечности скорости распространения взаимодействий. Этот факт не изменил сущности классического детерминизма. Мы же ставим своей целью не всесторонний анализ понятия причинности, а главным образом сопоставление причинности в динамических и статистических законах.)

Далее, уже в рамках классической физики была построена теория, хотя и не разрушившая концепции классического детерминизма, но в значительной мере подорвавшая веру в его абсолютный характер. Речь идет о статистической механике.

В статистической механике, как уже говорилось, состояние системы характеризуется не набором точных значений координат и импульсов всех частиц, а функцией распределения, дающей вероятность того, что координаты и импульсы частиц системы имеют определенные значения. Иначе говоря, состояние системы в данный момент определяют не координаты и импульсы всех частиц, а то, как часто в ансамбле тождественных систем встречаются различные значения координат и импульсов частиц.

По функции распределения в данный момент времени (и, конечно, известной энергии взаимодействия) можно однозначно найти вероятность определенных координат и импульсов в любой последующий момент. Координаты и импульсы частиц системы рассматриваются как случайные величины, не определяемые однозначно макроскопическими условиями (температурой, давлением, объемом и т. д.), в которых находится система. Причинно

связаны вероятности координат и импульсов. Это новая форма причинности, которую можно назвать *вероятностной причинностью*. Впрочем, в основном понимание причинности остается прежним: состояние системы в данный момент однозначно определяется состоянием системы в предшествующий момент. Только способ описания состояния становится новым, вероятностным.

Вероятностная причинность переходит в однозначную в предельном случае, когда функция распределения становится дельтаобразной, и, следовательно, отличны от нуля вероятности только строго определенных значений координат и импульсов.

С вероятностной причинностью мы встречаемся не только в статистической механике, но и в любой статистической теории, в частности в микроскопической электродинамике.

Все же до появления квантовой механики можно было, как представлялось, думать, что в основе мироздания лежат динамические законы с их однозначной причинностью. Пусть незначительные изменения начальных условий в сложных системах приводят к сильным изменениям их конечных состояний, так что малые ошибки в начальных условиях равносильны полному незнанию дальнейшего поведения системы и невозможности однозначных предсказаний. Все же, казалось, можно было считать, что вторжение этих ошибок имеет практическое, а не принципиальное значение. Классический детерминизм, хотя бы в качестве некой абстрактной возможности, как думали, оставался.

Положение коренным образом изменилось после открытия статистического характера законов движения отдельных микрочастиц, после создания квантовой механики. Оказалось, что вероятностная причинность может существовать сама по себе, без стоящей за ней однозначной динамической причинности. Статистические закономерности с присущей им формой причинности глубже отображают объективные связи природы, чем динамические. Соответственно и *вероятностная форма причинности действительно является основной, а однозначная — лишь ее вырожденным частным случаем*.

В квантовой механике состояние системы полностью характеризуется волновой функцией $\Psi(x, y, z, t)$, определяющей распределение вероятностей для любой физической величины. Эта функция удовлетворяет урав-

нению Шредингера, имеющему производную первого порядка по времени. Поэтому, если известны волновая функция $\Psi(x, y, z, t_0)$ в начальный момент времени t_0 и гамильтониан системы, определяемый энергией взаимодействия частиц, то уравнение Шредингера позволяет однозначно найти волновую функцию в произвольный последующий момент времени t . Вследствие этого начальное состояние $\Psi(t_0)$ вместе с определенным законом взаимодействия частиц можно рассматривать как причину, а состояние в последующий момент $\Psi(t)$ — как следствие.

Отвергая для микромира динамическую причинность того типа, который существует в классической механике и электродинамике, квантовая механика демонстрирует, что вероятностная причинность справедлива здесь в той же мере, что и для объектов классических статистических теорий.

Например, зная начальное состояние электронов, падающих на дифракционную решетку, заданное в виде плоской волны де Бройля (состояние с определенным импульсом), можно однозначно предсказать характер распределения электронов на экране — дифракционную картину. Вид дифракционной картины, образованной частицами с заданным импульсом, определяется однозначно, но поведение отдельных электронов в рамках необходимости (возникновения данной картины) остается случайным. Электроны в одном и том же состоянии попадают после дифракции на различные участки экрана. Уточнить каким-либо образом начальное состояние частицы с тем, чтобы можно было проследить в деталях за ее движением и предсказать, куда она попадет после прохождения дифракционной решетки, принципиально невозможно. Любая попытка фиксации координат частиц до дифракции так изменит их импульсы, что вся дифракционная картина окажется смазанной.

Особенно отчетливо статистический характер явлений микромира обнаруживается при распаде радиоактивных ядер и нестабильных элементарных частиц. Строго фиксированное значение для радиоактивных ядер имеет среднее время жизни, определяемое вероятностью распада, которую в принципе можно вычислить с помощью квантовой механики. Так, среднее время жизни изотопов урана с массовым числом 238 примерно равно $6,4 \cdot 10^9$ лет. Но эта величина ничего не говорит о том,

когда распадется данный атом. Он может пролежать в урановой руде миллиард лет и вдруг в одно мгновение без какого-либо внешнего повода распасться. Другие же атомы могут спокойно существовать еще миллионы лет. Вероятность распада атомного ядра не зависит от его возраста.

Аналогичным образом происходит распад элементарных частиц, например нейтронов. В атомных реакторах нейтроны рождаются в огромных количествах. Их среднее время жизни *17 мин.* Некоторые нейтроны распадаются сразу же по выходе из ядра урана, а другие могут прожить и полчаса. Как и ядра, нейтроны «не стареют». Вероятность их гибели посредством распада не изменяется со временем. Распад нейтрона — это не «смерть от старости», а «несчастный случай» в жизни частицы, и поэтому его наступление нельзя точно предсказать.

Квантовая механика принадлежит к статистическим теориям совсем не потому, что еще не удалось разобраться в деталях поведения микрообъектов и приходится довольствоваться их вероятностным описанием. Статистический характер поведения микрочастиц является объективным фактом, и теория процессов в микромире не может не быть статистической.

Сказанное выше согласуется с теми представлениями о причинности, которые изложены Баженовым в цитированной выше книге. Вызывает лишь возражение его критическое замечание о взглядах Фока на причинность, согласно которым принцип причинности «непосредственно относится к вероятностям, т. е. к потенциально возможным, а не к действительно осуществляющимся событиям» ([89], стр. 174). «Навряд ли,— пишет Баженов,— стоит относить причинность непосредственно лишь к вероятностям, а не к действительно осуществившимся событиям, ибо это опять связывает причинность только с однозначностью, против чего возражает (и справедливо) сам В. А. Фок» ([42], стр. 238). Но ведь и Баженов считает, что «причинно обусловленные процессы тем и характеризуются, что в них задание начального состояния определяет последующие состояния, и именно в наличии такой последовательности состояний и заключается наиболее важное для науки выражение принципа причинности» ([42], стр. 212). Все это совершенно справедливо. Однако состояние в квантовой механике характеризуется Ψ -функцией и связь состоя-

ний представляет собой однозначную связь начального и конечного векторов состояний системы.

Правда, вряд ли следует особо подчеркивать, как делал Фок, что причинность в квантовой механике не относится к действительно осуществляющимся событиям. Если рассматривается индивидуальный акт, скажем прохождение одного электрона сквозь дифракционную решетку, то это, конечно, так. Но весь смысл статистического закона состоит в предсказании поведения коллектива. Если через решетку проходит коллектив электронов, то волновая функция непосредственно описывает распределение электронов по экрану, т. е. действительно осуществившееся событие (но уже не индивидуальное).

Остановимся на еще одном аспекте причинности в квантовой теории поля, превращающем принцип причинности в активное начало, используемое в совершенно явной форме при развитии теории.

События должны быть упорядочены так, чтобы причина всегда предшествовала следствию. Для этого, согласно теории относительности, необходимо наложить запрет на распространение каких-либо сигналов или действий со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Такой запрет легко осуществляется в квантовой теории взаимодействия точечных частиц (т. е. в теориях, рассматривающих частицы как материальные объекты, не имеющие протяженности), в так называемых локальных теориях. Однако точечность частиц приводит в квантовой теории (так же как и в классической) к ряду трудностей, связанных с появлением бесконечных выражений для массы, заряда и т. д. Поэтому, как уже говорилось в гл. II, предпринимаются попытки построения нелокальных теорий — теорий, в которых в той или иной форме проводится идея отказа от точечности частиц. Но такой отказ приводит к появлению сверхсветовых сигналов на малых расстояниях и при малых промежутках времени, что в свою очередь означает нарушение микропричинности, принятой в современной квантовой теории поля и означающей, что состояние системы в данный момент времени однозначно определяет состояние в любой последующий *сколь угодно близкий* ему момент.

Правда, для согласия теории с экспериментом достаточно лишь, чтобы предыдущее состояние системы определяло последующее спустя конечный интервал

времени. Поэтому можно отказаться от упорядоченности событий во времени при очень малых интервалах с тем, разумеется, чтобы она сохранилась при макроскопических интервалах, с которыми имеет дело эксперимент. Однако до сих пор удовлетворительной теории, которая при отказе от упорядоченности событий во времени на микроскопических интервалах сохраняла бы такую упорядоченность для макроявлений, построить не удалось.

Наконец, большую роль принцип причинности играет в аксиоматическом подходе к построению квантовой теории (см. гл. II). Главное, что отличает аксиоматический подход от других попыток выхода за рамки существующих теорий,— это требование микропричинности. Таким образом, если во времена Ньютона классическая механика впервые позволила придать принципу причинности точную форму, то в настоящее время сам этот принцип (в измененном виде) становится одним из исходных пунктов при построении новой физической теории.

Все сказанное до сих пор о причинности представляется нам достаточно обоснованным. Сделаем теперь последнее замечание, носящее характер предположения, справедливость которого обосновать достаточно убедительно в настоящее время вряд ли возможно.

Точно формулируемая количественная (или теоретическая) вероятностная причинность в классических статистических теориях не исчерпывает причинности полностью. Кроме того, можно сказать, сохраняется понятие качественной (или наглядной) причинности в том смысле, что те или иные случайные значения координат, импульсов и других величин причинно обусловлены. Например, причиной очередного случайного броска броуновской частицы в определенном направлении являются дружные удары молекул о частицу с одной стороны.

Совершенно очевидно, что наличие в статистической механике вероятностной причинности, невозможность однозначных предсказаний значений координат и импульсов не означают невозможности качественно установить, с чем именно связано различие в поведении отдельных объектов системы, находящейся в фиксированных макроскопических условиях. Все это, разумеется, справедливо при условии, что динамический закон для движения индивидуального объекта, например броуновской частицы, лишен смысла.

Нельзя заранее полностью исключить возможность того, что и в квантовой механике качественная причинность все же способна объяснить детали того или иного поведения микрообъекта. Определенное отклонение электрона при дифракции, распад частицы в данный момент и т. д. имеют какие-то причины. Так, в частности, взаимодействие частиц с вакуумом можно рассматривать как проявление универсальной связи микрообъектов, исключающей возможность их полной индивидуализации. Это взаимодействие статистического характера, быть может, и обуславливает детали поведения отдельных микрообъектов. Но отсюда, конечно, ни в коем случае не вытекает, что для микрообъектов допустимы законы динамического типа.

Гейзенберг на примере α -распада следующим образом формулирует два возможных подхода к объяснению единичных случайных событий в микромире. «Благодаря эксперименту мы приходим к убеждению, что законы квантовой теории правильны; если мы признаем их правильность, то, следовательно, должны считать, что нет никакого предшествующего события, из которого с необходимостью должно в определенное время последовать излучение.

Другой возможный ответ: мы знаем предшествующее событие, но знаем неточно. Мы, конечно, знаем силы в атомных ядрах, ответственные за α -распад, но это знание содержит неопределенность, которая обусловлена взаимодействием атомного ядра с остальным миром. Если мы хотим знать причину, почему α -частица излучается именно в данный момент, то, по-видимому, должны для этого знать микроскопическое состояние всего мира, к которому мы и сами принадлежим, а это, очевидно, невозможно» ([71], стр. 65).

§ 7. Вероятность и причины статистического характера физических теорий

В работах, посвященных статистическим закономерностям и их связи с динамическими, обычно значительное внимание уделяется причинам статистического характера различных физических теорий и анализу понятия вероятности применительно к физике. Займемся этими вопросами и мы.

С самого начала нужно отметить, что сама их постановка в той форме, в какой это обычно делается, не вполне правомочна. Во всяком случае, она нуждается в уточнении.

Если считать динамические законы наиболее глубокими, или первичными, то, разумеется, вопрос о причинах появления в некоторых случаях вероятностных статистических законов имеет очевидный непосредственный смысл. И если понятие вероятности не является основным для самых фундаментальных физических законов, а динамическим законам вероятность чужда по самому своему смыслу, то это понятие нужно как-то обосновать с позиций главенствующей роли динамических закономерностей. Но выше мы показали (и, надеемся, достаточно убедительно), что в действительности последние совсем не играют такой роли. Именно статистические закономерности, использующие понятие вероятности в качестве основного, представляют собой наиболее совершенное отображение объективных связей в природе и в этом смысле являются первичными. Поэтому нам и кажется неоправданной обычная постановка вопросов об анализе причин статистического характера физических теорий и понятия вероятности.

Многие исследователи, занимающиеся анализом понятия вероятности и соотношения динамических и статистических закономерностей, отчетливо понимают, что нужно начинать исследование этих проблем не с обоснования понятия вероятности и не с предвзятых представлений о значении тех или иных закономерностей. Например, в статье Амстердамского «Об объективных интерпретациях понятия вероятности», опубликованной в интересном сборнике статей польских ученых, говорится следующее: «Мы хотим понять и интерпретировать смысл вероятностных суждений в соответствии с функцией, которую они выполняют в пределах научных систем, прежде всего в теоретических системах эмпирических наук, а не подгонять этот смысл к какой-то интерпретации, принятой независимо от этой функции, даже в том случае, если она должна была бы быть в формальном отношении правильной» ([90], стр. 47). И далее: «Проблемы, являющиеся предметом спора между детерминизмом и индетерминизмом в физике, решаются не интерпретациями вероятностных суждений, а физическими теориями. От состояния их развития и зависит

в конечном счете ответ на вопрос о характере объективных закономерностей в природе, а также на вопрос о смысле вероятностных суждений» ([90], стр. 67). В этих двух высказываниях все правильно, за исключением терминологии. Индетерминистскими автор называет статистические закономерности, хотя в основном правильно понимает их смысл и значение. Такая терминология способна лишь вызывать недоверие к статистическим закономерностям как наиболее фундаментальным законам природы.

Однако ряд авторов придерживается мнения, что только анализ понятия вероятности позволяет установить природу статистических законов и их отношение к динамическим. Настойчиво эту мысль проводил в ряде работ Сачков. Так, например, по его мнению, в нашей статье [9] отсутствует анализ понятия вероятности и поэтому нет адекватного действительности истолкования сущности отношения статистических и динамических законов. Подробно точка зрения Сачкова изложена в работе, опубликованной в сборнике [7] (стр. 257). Аналогичные мысли о настоятельной необходимости анализа понятия вероятности высказывает и развивает Пахомов в статье «О природе статистических законов» [91].

В основе работ Сачкова и Пахомова лежит статья Хинчина «Метод произвольных функций и борьба против идеализма в теории вероятностей» [92]. Эта статья создала у них, а также, вероятно, и у многих других авторов обманчивое впечатление о появлении совершенно нового материалистического подхода к истолкованию понятия вероятности, а с ним вместе и нового строгого решения проблемы соотношения статистических и динамических законов *). На самом же деле никаких оснований для подобных заключений статья Хинчина не дает. Убедимся в этом, рассмотрев ее подробно.

В начале статьи Хинчин отмечает, что вероятность события должна быть близка к частоте его появления при большом числе испытаний. Это утверждение лежит в основе частотной интерпретации вероятностей Мизеса и, бесспорно, справедливо. Далее Хинчин основную

*) В настоящее время Сачков пересмотрел свою точку зрения. В своей последней книге [94] он присоединяется к мысли о большей общности и содержательности статистических законов по сравнению с динамическими.

проблему в обосновании понятия вероятности видит в отыскании условий, которым должно удовлетворять явление для того, чтобы частоты связанных с ним событий обладали бы устойчивостью. Более того, он ставит задачу определения этих частот из динамических законов поведения отдельных элементов статистической совокупности. Решение таких задач, согласно автору, должно лечь в основу материалистической интерпретации вероятности, а попытки уклониться от них он рассматривает как склонность к идеализму, а точнее, к махизму.

С самого начала возникают сомнения в возможности, используя только «объективные особенности самих явлений» и не прибегая к постулативному введению того или иного статистического распределения, получить доказательство устойчивости частот, т. е. существование статистического закона. Хинчин же утверждает, что это не только возможно, но и необходимо, и предлагает разработанный им метод произвольных функций. Его суть он демонстрирует на одном простом модельном примере, вычисляя с помощью своего метода вероятность события без, как ему кажется, каких-либо определенных гипотез о начальном статистическом распределении. Далее говорится, что и в других простых случаях получаются сходные результаты, а в сложных дело упирается только в математические трудности. Вообще же метод применим к сколь угодно сложным консервативным механическим системам. Тем самым предполагается, что найдено обоснование всей статистической механики. Однако в действительности уже простой пример Хинчина, разобранный им формально правильно, не позволяет делать те выводы, о которых говорится в работе.

В качестве модели Хинчин рассматривает упрощенную рулетку. Шарик (материальная точка) движется по окружности единичного радиуса. Движение начинается всегда в одной точке O в одном направлении, но начальная скорость различна в различных испытаниях. Окружность разделена на $2n$ равных частей, попеременно окрашенных в красный и черный цвет. Спрашивается, какова вероятность $P(A)$ того, что шарик спустя время t окажется на красном поле? Из соображений симметрии очевидно, что $P(A) = 1/2$, но требуется это теоретически обосновать с помощью известного механизма явления.

На первый взгляд, замечает Хинчин, трудности кажутся непреодолимыми. Частота события A (шарик ока-

зывается на красном поле) зависит от того, как часто при эксперименте реализовались те или иные начальные скорости, т. е. от закона распределения начальных скоростей. Но этот закон будет меняться от инструмента к инструменту. Как же, не зная закона распределения начальных скоростей, найти некое универсальное значение частоты наступления события A , существенным образом зависящей от неизвестного нам закона?

Хинчин приступает к делу, вводя произвольную функцию $f(v)$ распределения начальных скоростей. Единственное требование, налагаемое на нее, — непрерывность. Далее используется только кинематический закон движения $s = vt$. Путем не очень сложных расчетов, которые мы не будем здесь приводить, Хинчин показывает, что

$$|P(B) - P(A)| \leq \int_0^{\infty} \left| f\left(v + \frac{1}{2nt}\right) - f(v) \right| dv,$$

где $P(B)$ — вероятность наступления события B , состоящего в том, что шарик спустя время t попадает на черное поле. Очевидно, что $P(A) + P(B) = 1$. Увеличивая неограниченно t , получим $|P(B) - P(A)| \rightarrow 0$, и, следовательно, $P(A) = 1/2$. Каков бы ни был закон распределения начальных скоростей, найдено значение вероятностей событий A и B при $t \rightarrow \infty$.

Однако ценность полученного результата очень мала. Дело в том, что он справедлив только при $t \rightarrow \infty$. А ведь если время движения очень велико, то сколь угодно малая неопределенность в начальной скорости ведет к полной неопределенности положения частицы на окружности. Если распределение начальных скоростей на бесконечно малом интервале равномерно (а эта локальная равномерность и означает непрерывность функции распределения $f(v)$, требуемую в доказательстве Хинчина), то все положения частицы на окружности при $t \rightarrow \infty$, очевидно, равновероятны, и поскольку половина окружности имеет красный цвет, то вероятность события A равна $1/2$. Никаких расчетов для ее нахождения делать не надо.

Если время t конечно (что соответствует обычным условиям игры в рулетку), то для получения наблюдаемой на опыте частоты нужно допустить, что распределение начальных скоростей равномерно на конечном интервале. Иными словами, как и следовало ожидать,

необходимо постулировать устойчивость частоты для начального состояния. Необходимость такого допущения у Хинчина замаскирована требованием непрерывности начальной функции распределения и условием $t \rightarrow \infty$, не реализующимся в реальном эксперименте.

Приведенные соображения, разумеется, относятся и к другим, более сложным случаям, в частности к тем, которые разбираются качественно в упомянутой выше статье Пахомова. Останавливаться на них нет нужды.

Было бы весьма странно, если бы метод произвольных функций действительно позволял делать статистические предсказания для любых механических систем без введения каких-либо вероятностных предположений. Фактически это означало бы полное доказательство того, что классическая статистика следует из классической механики непосредственно, без дополнительных гипотез. В действительности это не так, что и было показано в § 3 гл. III.

Ведь что означает требование Хинчина доказать наличие устойчивых частот при определенных условиях? Наличие устойчивых частот равносильно существованию статистического закона, ибо без их устойчивости нет понятия вероятности и нет статистического закона. Но статистический закон — это наиболее глубокая и общая форма закона вообще. Мы открываем различные фундаментальные законы природы. Но пытаться объяснить, почему они существуют, т. е. почему событиям в природе присущи определенные закономерности, не имеет смысла. Наличие статистической закономерности — главный, первичный факт, благодаря которому вообще возможна наука. Признание существования закономерных связей лежит в основе диалектического материализма.

В статистической теории любое распределение (а значит, и существование устойчивых частот) вытекает из какого-либо другого распределения. Так, в классической равновесной статистике достаточно постулировать микроканоническое распределение, т. е. равномерное распределение изображающих точек статистического ансамбля на поверхности постоянной энергии (в элементарной молекулярно-кинетической теории этому соответствует гипотеза о полном хаосе теплового движения). Но доказать микроканоническое распределение в рамках одной лишь классической механики нельзя.

Аналогично, для объяснения опыта с рулеткой нужно допустить равномерное распределение скоростей на конечном интервале.

Несмотря на все изложенное выше, из анализа опыта с рулеткой и других подобных опытов делаются чрезвычайно далеко идущие выводы о смысле понятия вероятности, статистического закона и соотношения двух видов закономерностей. Предлагается даже интерпретация квантовой механики, статистические законы которой якобы основаны на динамических закономерностях.

Метод Хинчина исходит из подчинения строгим динамическим закономерностям каждого индивидуального процесса, являющегося элементом вероятностной совокупности. Отсюда можно прийти к выводу, что анализ причин устойчивости частот в этих ансамблях означает якобы, что каждый индивидуальный объект, образующий вероятностный ансамбль, подчиняется строгой динамической закономерности. Так получается вывод об основополагающей роли динамических законов.

Не удивительно, что причину статистического характера квантовой механики усматривают в начальном распределении систем по скрытым параметрам. Здесь ситуация такая же, как и в рулетке Хинчина, где скрытыми параметрами служат скорости шариков.

По нашему мнению, для понимания действительного отношения статистических законов к динамическим в понятии вероятности нужно выделить два существенных обстоятельства: во-первых, частотную интерпретацию вероятности и, во-вторых, объективный смысл понятия вероятности. Стремление же интерпретировать вероятность как результат действия динамических законов фактически сразу же означает принятие (бездоказательное) за основу такого положения, которое служит готовым решением проблемы соотношения динамических и статистических законов. Считать таким доказательством метод произвольных функций нет никаких оснований.

Частотную интерпретацию вероятности никто сейчас серьезно не отрицает. В частности, сам Хинчин в статье «Частотная теория вероятностей Р. Мизеса и современные идеи теории вероятностей» [93] *) говорит о том,

*) Кстати, в этой статье ценность метода произвольных функций автор видит в том, что «идея равнозначных случаев, поднятая на высоту локальных равновероятностей, принципиально способна при-

что частотная теория не дает аксиоматику теории вероятностей, но любая формально безупречная аксиоматика должна допускать частотную интерпретацию. Поэтому в нашем исследовании на этом вопросе нет необходимости останавливаться подробнее. Не будем мы останавливаться и на объективном смысле понятия вероятности, так как в настоящее время сомневающийся в нем довольно мало. Эти сомнения означают одновременно отрицание объективного смысла статистических законов в физике. Ограничимся лишь приведением одного высказывания Смолуховского: «Совершенно ясно, что, поскольку дело касается применения в теоретической физике, все теории вероятностей, которые рассматривают случайность как непознанную частную причину, должны быть заранее признаны неудовлетворительными. Физическая вероятность события может зависеть только от условий, влияющих на его появление, но не от степени нашего знания» [95].

Отправляясь от признания того, что статистические законы есть более совершенная форма отражения реальных связей природы, чем динамические, следует по логике вещей основную проблему видеть в обосновании применимости в ряде случаев более простых динамических законов, а не наоборот. Если известен объективный критерий того, когда можно пользоваться динамическими законами, а когда только статистические законы способны описывать процессы в природе, то вопрос о причинах статистического характера законов в принципе можно считать выясненным. Проблема же применимости динамических законов обсуждалась в гл. IV.

Означает ли это, что вопрос о природе статистического характера физических законов, в частности законов квантовой механики, вполне решен? Это все же не совсем так. Вполне корректна и заслуживает внимания следующая постановка вопроса. В чем причина того, что сравнительно простые динамические законы с их точными однозначными связями между всеми физиче-

носить науке прекрасные плоды». В статье же [92] Хинчин отрицает какую-либо ценность классического определения вероятности как равновероятности исхода симметричных событий и называет его идеалистическим. (Статья в «Вопросах философии» была написана до статьи в сборнике, но опубликована позднее, уже после смерти автора.)

скими величинами, дающие в принципе возможность однозначных предсказаний, на самом деле в очень большом числе случаев непригодны для описания явлений и поэтому приходится прибегать к более сложным по структуре статистическим законам, не позволяющим однозначно предсказывать значения физических величин? Конечно, здесь мы, в сущности, имеем дело с обращением той постановки проблемы, которая уже рассматривалась нами в гл. IV, и это не сулит ничего принципиально нового. Но все же полезно на этом остановиться, главным образом для того, чтобы критически обсудить опубликованные в литературе соображения о причинах статистического характера законов природы.

Как установлено в гл. IV, статистические законы необходимы для описания движения отдельных тел или их небольших групп в двух случаях. Во-первых, если действие $S \sim \hbar$, то не существует единственной траектории, соединяющей начало и конец пути частицы в силовом поле. Соответственно несправедливы и динамические законы, предсказывающие единственную траекторию. Во-вторых, даже при $S \gg \hbar$ необходимо статистическое описание, если интервал времени, на котором можно с достаточной точностью определить поведение системы, не слишком мал. Этот интервал тем меньше, чем большим независимым случайным воздействиям подвергается система и чем сложнее связи внутри нее.

Для систем с большим числом частиц статистические законы становятся существенными, когда макроскопические процессы в них определяются флуктуациями в малых частях систем или же когда существенны флуктуации в больших частях систем или в системе в целом. В данных случаях относительные флуктуации убывают, как правило, с увеличением числа частиц.

Каковы же общие причины появления статистических законов? Остановимся пока на законах классической физики, так как в ней в принципе положение гораздо яснее, чем в квантовой механике. Физическая сторона здесь прозрачна, и дело лишь в истолковании всем известных бесспорных фактов. Вначале кратко остановимся на различных точках зрения.

1. Появление статистических законов обусловлено нашим незнанием точной картины поведения объектов, невозможностью проследить за движением частиц системы либо вследствие их громадного количества, либо же

вследствие неполного знания их начального состояния. Приходится довольствоваться вероятностным описанием.

2. Статистические законы являются закономерностями особого типа, объективно присущими совокупностям большого числа частиц.

В соответствии с первой точкой зрения (ее придерживался Бом в своих первых работах по интерпретации квантовой механики [96], а также и другие ученые) случайное, присущее статистической закономерности, рассматривается как чисто субъективное. Подобные воззрения критиковались множеством авторов, в том числе Энгельсом. Содержится критика и в данной книге. Поэтому на этой точке зрения мы останавливаться не будем.

Более содержательна вторая точка зрения. Однако и она вряд ли вполне удовлетворительна. Ее недостатки видны уже из отмеченного ранее обстоятельства: отступление от динамического типа закономерности, наличие случайных флуктуаций в системах из большого числа частиц тем значительнее, чем меньше частиц входит в рассматриваемую систему. Наконец, уязвимость данной точки зрения вытекает из факта существования броуновского движения. Здесь статистический закон присущ движению одной частицы. Довод, указывающий на то, что в броуновском движении мы в действительности имеем дело с очень сложной системой — частица плюс среда, — нельзя считать убедительным. Изучаем-то мы движение именно отдельной частицы и для нее записываем уравнение движения Эйнштейна — Фоккера — Планка или Ланжевена. Среда же для броуновской частицы служит просто термостатом, с которым она находится в состоянии теплового равновесия. Точно так же системы, состоящие из большой совокупности частиц и подчиняющиеся каноническому распределению Гиббса, находятся в равновесии с еще большей системой — термостатом.

Причина весьма распространенного заблуждения о природе статистических законов, по нашему мнению, заключается в следующем. По самому своему смыслу статистическая закономерность относится не к одной системе, а к совокупности идентичных систем и может быть проверена только серией опытов над ними, причем под системой понимается в зависимости от условий рассматриваемой задачи или *совокупность большого числа*

частиц, или же одна частица, как в случае броуновского движения. Согласно Гиббсу, совокупность идентичных систем — ансамбль — можно рассматривать как мысленные копии одной-единственной реальной системы, которая изучается. Для наличия ансамбля совсем не нужно реально иметь большой (строго говоря, бесконечный) набор идентичных систем. Достаточно одной. При экспериментальной проверке теории тоже достаточно располагать одной системой, наблюдая ее на протяжении достаточно большого промежутка времени или же проводя с ней повторные эксперименты. Это возможно, так как системы, составляющие ансамбль, реально, физически не взаимодействуют. Например, для определения среднего квадрата смещения броуновской частицы достаточно проследить движение частицы на большом количестве отрезков, пройденных частицей за небольшие одинаковые промежутки времени. Даже при нестационарном броуновском движении можно исследовать его законы, проделав серию опытов с одной и той же частицей в одинаковых, хотя и нестационарных условиях.

Из статистического характера закономерности данного явления (включающей в рассмотрение случайные события) следует необходимость рассмотрения ансамбля, т. е. большого количества идентичных систем. Утверждение же о том, что причина статистичности закономерности заключается в наличии совокупности, несправедливо в том смысле, что здесь следствие (необходимость рассмотрения совокупности) выдается за причину.

3. Наиболее целесообразно причину статистического характера закономерности (с учетом указанных ранее оговорок) искать не в большом числе частиц в системе, а в наличии большого числа непосредственно не зависящих друг от друга воздействий на систему (связей системы) со стороны окружающего мира, а также большого числа связей внутри самой системы, если число степеней свободы системы велико. Разумеется, речь здесь идет о воздействиях, способных оказать заметное влияние на поведение системы.

Для броуновской частицы это совершенно очевидно. Множество воздействий со стороны молекул, перемещения которых относительно независимы, определяет статистический характер поведения броуновской частицы. Аналогично, флуктуации плотности и других величин в малых объемах больших систем обусловлены много-

численными воздействиями на частицы в рассматриваемом объеме со стороны остальной части системы.

В общем, чем больше воздействий испытывает объект, тем меньше то критическое время, на протяжении которого можно однозначно фиксировать его переход из малой начальной области фазового пространства в конечную, также малую область. Ранее приводился наглядный пример Бореля с молекулой газа.

Приведем теперь другой, более тривиальный пример: при любой карточной игре, начиная с элементарного подкидного и кончая бриджем, основная операция — тасовка колоды — состоит из большого числа независимых воздействий на карты, которые и обеспечивают примерную равновероятность любого распределения карт в колоде перед сдачей.

Несколько иначе обстоит дело при игре в рулетку, кости или орлянку. В самой простой из них — орлянке, где возможны два исхода: орел или решка, — полностью отражена статистическая суть и более сложных игр этого типа. Тот или иной исход единичного испытания определяется главным образом начальными условиями, т. е. начальным положением монеты и ее начальной скоростью. Однако, когда при касании пола монета почти вертикальна, исход испытаний очень критичен к вариациям начальных условий. Если же она не вертикальна при касании, то нетрудно создать устройство, которое могло бы реализовать начальные условия с точностью, однозначно гарантирующей наступление определенного события. Нужно лишь, чтобы высота падения монеты не была слишком велика. Только при падении, очень близком к вертикальному, исход испытания неоднозначен (возникает ситуация, называемая «взрывом Пуанкаре»). Но в этом случае на поведение монеты существенно влияют даже мельчайшие неровности пола и в конечном счете даже тепловые флуктуации. Здесь уже статистика в поведении монеты явно определяется большим числом независимых элементарных воздействий.

Для статистического характера поведения системы из большого числа частиц существенно не просто большое их число, а *большое число взаимодействующих частиц*. Если бы частицы не взаимодействовали, то легко себе представить, что никаких статистических закономерностей для их поведения не существовало бы. Можно сказать, что наличие статистических законов для большой

системы обусловлено статистическим характером поведения отдельных ее молекул, каждая из которых взаимодействует с большим числом всех остальных молекул.

Остановимся теперь на причинах статистического характера квантовой механики. Самую общую его основу, по нашему мнению, можно усмотреть в следующем. По-видимому, вообще при переходе к микромиру основной закон диалектики — закон единства противоположностей — проявляется особенно отчетливо. Нельзя рассматривать отдельные противоположные стороны явлений порознь, а необходимо их с самого начала брать в единстве. Единство прерывного и непрерывного находит свое отражение в дуализме элементарных частиц — их корпускулярно-волновых свойствах. Движение как единство противоположностей также выступает непосредственно. Частица одновременно, можно сказать, и находится, и не находится в определенном месте пространства. Необходимо рассматривать движение на конечном участке. Как следует из принципа неопределенностей, траектория классической механики, рассматривающей движение как совокупность определенных положений в пространстве с соответствующими скоростями в каждой точке, в микромире не существует. Точно так же *в квантовой механике необходимое и случайное выступают в непосредственной связи, что находит отражение в статистическом характере законов движения элементарных частиц.*

Перейдем теперь к более детальному рассмотрению различных точек зрения на причины статистического характера квантовой механики.

1. Во-первых, существуют точки зрения, аналогичные соответствующим взглядам на причины статистического характера законов классической физики. Ряд авторов полагает, что статистический характер квантовой механики обусловлен неполным знанием объективной реальности (в данном случае микрообъектов). Более полное знание позволит найти динамические законы поведения микрочастиц, но пока оно еще не достигнуто (Эйнштейн, Бом, Терлецкий и др.). Считая эту точку зрения совершенно неправильной, мы не будем сейчас особо останавливаться на ее критике. Все наше исследование в целом как раз и направлено в первую очередь против подобных попыток утверждения примата динамических законов.

2. Далее, некоторые ученые считают, что квантовая механика изучает непосредственно свойства статистических ансамблей и неприменима к описанию поведения индивидуальных микрообъектов. «Исследуя явления, существенно зависящие от кванта действия \hbar , ... мы имеем дело со статистическими задачами... Применение квантовой теории к анализу отдельного измерительного процесса в атомной области не дает полной характеристики последнего вследствие статистического характера всякой квантовой проблемы» [97]. К данной точке зрения, сформулированной впервые Никольским, в настоящее время близки взгляды довольно большой группы ученых нашей страны. Она развита, в частности, в известном учебнике Блохинцева [58] *).

Данная точка зрения близка к предыдущей, хотя внешне кажется противоположной ей: вместо статистичности теории вследствие неполноты знаний выдвигается на первый план неполнота сведений, относящихся к индивидуальному акту, вследствие статистичности теории. Не случайно Терлецкий, уверенный в примате динамических законов, вместе с тем полагает, что «...квантовая механика является статистической теорией, т. е. теорией, применимой только к статистическим совокупностям микрообъектов... Она отражает лишь поведение совокупности тождественных микрообъектов, представленных либо одновременно, либо в последовательной серии опытов» [107].

При внимательном знакомстве с детальным анализом квантовой механики, проведенным Блохинцевым на основе концепции ансамблей, трудно отрешиться от чувства неудовлетворенности, вызванной невозможностью проследить за связью между всеми его высказываниями. Так, в одной из своих статей ([100], стр. 379) он пишет: «Причина... несостоятельности лапласовского детерминизма лежит в невозможности изоляции единичной микросистемы от макрообстановки... Поэтому единичные микроявления управляются статистическими закономерностями». Если это так, то не вполне ясно, почему следует всемерно подчеркивать, что квантовая теория применима только к ансамблю частиц, но не к одной частице.

*) Следует, впрочем, сразу отметить, что позиция Блохинцева в вопросе о природе статистического характера законов квантовой механики недостаточно последовательна.

Действительно, с одной стороны, статистичность законов с очевидностью означает, что они относятся не к одной-единственной системе, а к совокупности идентичных систем; они не могут быть подтверждены измерением, проделанным над отдельным индивидуумом, а подтверждаются лишь серией повторных измерений [98]. Однако, с другой стороны, если невозможна изоляция объекта от некоей среды, с которой он взаимодействует случайным образом, то никакого иного описания поведения одной частицы, кроме статистического, дать нельзя. Именно с таким положением мы встречались в теории броуновского движения, где частица, изъятая из среды, уже перестает быть броуновской частицей.

Поэтому тезис о квантовых ансамблях, ясный при предположении о динамичности законов движения микрочастиц (позиция де Бройля и др.), теряет свой абсолютный характер, если допустить, что статистике подчиняется поведение единичных объектов. И в этом смысле прав Фок, считая, что волновая функция характеризует состояние отдельной частицы.

Таким образом, концепция статистических ансамблей сама по себе ровным счетом ничего не поясняет; в частности, она не объясняет причин статистического характера квантовой механики. По-разному развивая и уточняя исходный тезис, можно прийти к необходимости отыскания динамических уравнений для элементарных частиц, что фактически совпадает с точкой зрения, выдвигаемой де Бройлем и другими, или к признанию неустранимого взаимодействия статистического характера между микрообъектом и окружающим миром, или же, наконец, к мысли о том, что «распадение динамических переменных на два класса дополнительных друг к другу величин является фундаментальной особенностью квантовой механики и ведет к неустранимой статистичности в квантовых ансамблях» ([34], стр. 81). Последнее утверждение принадлежит Блохинцеву, и оно уже почти прямо, за исключением слова «ансамбли», перекликается с утверждениями копенгагенской интерпретации квантовой механики и причин ее статистического характера (правда, здесь еще есть не очень понятный оборот речи: «неустраняемая статистичность» в статистическом ансамбле, ибо, по Блохинцеву, квантовый ансамбль — это ансамбль статистический). К точке зрения копенгагенской школы мы сейчас и перейдем.

3. «В то время как все взаимосвязи в области, относящейся к наблюдателю,— говорит Гейзенберг,— а также в области, содержащей изучаемые объекты, являются строго определенными (в первом случае — законами классической физики, а во втором — дифференциальными уравнениями квантовой механики), наличие резкой границы между этими областями обнаруживается в статистических взаимосвязях. Точнее, на границе этих областей воздействие средств наблюдения на объект наблюдения должно рассматриваться как частично неконтролируемое возмущение. Эта принципиально неконтролируемая часть возмущения, которая обязательно связана с каждым наблюдением, важна для нас во многих отношениях. Прежде всего, она является причиной появления статистических законов природы в квантовой механике» [99]. Вследствие того же неконтролируемого воздействия, утверждают сторонники копенгагенской школы, нельзя одновременно определить координату и импульс электрона.

Далее Гейзенберг утверждает: «В конечном счете проследить количественную цепь причин и следствий можно было бы, только включив весь мир в систему, но тогда физика уже исчезла и осталась только одна математическая схема. Разделение мира на наблюдающую и наблюдаемую системы препятствует, таким образом, точной формулировке закона причинности» ([66], стр. 21).

Критика приведенных выше положений копенгагенской интерпретации квантовой механики широко известна. Суть ее состоит в отрицательной оценке самого подхода Бора и Гейзенберга к проблеме. На первое место они выдвигают не факт существования новых по своей природе объектов, а возможности измерительных приборов ([100], стр. 364). На то же обстоятельство указывает Фок, который, вообще говоря, не согласен с пониманием квантовой механики Блохинцевым. «У Бора,— пишет Фок,— атомный объект как бы растворяется в измерительном приборе и становится менее реальным, чем измерительный прибор» [101].

И в самом деле. Распад нестабильных частиц, к примеру, подчиняется квантовым статистическим законам. Но вряд ли кто-нибудь возьмется прямо утверждать, что статистический характер этого распада определяется наличием каких-либо измерительных устройств. Он вообще может протекать и протекает в вакууме без каких-

либо воздействий со стороны приборов или вообще макротел. Или обратимся к относительным частотам распада частицы по тому или иному каналу. Их наличие определенно свидетельствует о статистическом характере поведения объекта, присущем ему самому.

Впрочем, надо сказать, что категорические утверждения об особой роли прибора очень настойчиво повторялись основателями копенгагенской школы только на первом этапе развития интерпретации квантовой механики. Бор в последние годы жизни, как справедливо подчеркивает Фок в предисловии к книге «Атомная физика и человеческое познание» ([63], стр. 8), значительно отошел от позитивистской методологии. То же можно сказать и о Гейзенберге, высказывания которого о причинности мы приводили выше (см. стр. 231). Ценным является также определенное изменение его взглядов на природу статистического характера квантовой механики и признание объективного характера причин статистичности законов микромира. Но об этом мы скажем немного ниже.

4. Довольно часто в литературе встречается утверждение, что статистический характер квантовой механики — следствие специфических свойств микрообъектов. В определенном смысле это, конечно, правильно. Но вся специфичность микрообъекта состоит в том, что его масса мала. Для частиц малой массы, движущихся в полях, напряженность которых заметно меняется на длине волны де Бройля, справедливы квантовые законы, так как связанное с их движением действие S равно по порядку величины постоянной Планка. Это очень отчетливо показано, в частности, Фейнманом. Таким образом, указание на специфичность объекта, безусловно, правильно, если только под ней понимать его малую массу, но сама по себе эта специфичность ровным счетом ничего не может объяснить.

Сторонники же специфических свойств микрообъектов как причины статистического характера квантовой механики имеют в виду нечто совсем иное. Так, например, Омеляновский считает, что «вероятности значений квантовых величин имеют свое основание в единстве, тождестве противоположных корпускулярных и волновых свойств микрообъектов» ([7], стр. 417). Подобные высказывания вряд ли справедливы. Во-первых, основная особенность микромира — дискретность действия,

наличие постоянной Планка. Величина кванта действий представляет собой универсальную константу, которая устанавливает определенный масштаб в природе. Если действие $S \sim \hbar$, то законы классической механики неприменимы. А такое соотношение между S и \hbar справедливо только для тел малой массы. Корпускулярно-волновой дуализм является не основной характеристикой микромира, а одним из многочисленных проявлений дискретности действия.

Особенно отчетливо неубедительность предположения о том, что статистический характер квантовой механики обусловлен дуализмом волна — частица, видна из фейнмановского представления квантовой механики. Наличие волновых свойств у свободной частицы, как вытекает из определения амплитуды $A(a, b)$ вероятности перехода из точки a в точку b , выступает как приближение, справедливое при условии, что можно пренебречь зависимостью пространственного периода $A(a, b)$ от координаты x (при больших x) и зависимостью изменения амплитуды $A(a, b)$ от времени t (при больших t). В этом случае приближенно можно написать ([46], стр. 54—59)

$$\lambda \approx \frac{2\pi\hbar}{mx/t}$$

и

$$\hbar\omega \approx \frac{1}{2} m (x/t)^2.$$

Далее, наличие волновых свойств у частиц выражается в том, что состояние системы характеризуется волновой функцией; в случае движения свободной частицы с заданным импульсом — плоской волной де Бройля. Но ведь эта волна — статистическая характеристика микрообъекта — волна вероятности. Поэтому утверждение о том, что статистический характер законов квантовой механики обусловлен дуализмом волна — частица, выглядит довольно странно. Волновые свойства проявляются статистически при наблюдении над совокупностью частиц. Таким образом, наличие волновых свойств означает статистический характер поведения микрообъекта, но никак не является его причиной. Если в случае электромагнитных волн и представляется возможным рассматривать волны напряженностей полей E и H отчасти в классическом смысле, т. е. считать, что они

описывают непрерывное распределение в пространстве и времени энергии и импульса, то для частиц с полужелтым спином такая трактовка волн уже невозможна.

Наконец, волновая функция Ψ не является величиной, которую можно измерить, и, следовательно, сама по себе она не имеет непосредственного физического смысла.

Естественно, что у Омеляновского, равно как и у других авторов, сторонников объяснения вероятностной природы квантовой механики дуализмом волна — частица, отсутствует анализ того, каким образом этот дуализм ведет к статистике. Поэтому мы склонны считать, что объяснение статистического характера законов спецификой свойств микрообъектов ни в малой степени ничего не поясняет.

Полные права гражданства имеет точка зрения, согласно которой «в квантовой физике понятие вероятности есть понятие первичное, и оно играет там фундаментальную роль» ([89], стр. 166). И не нужно пытаться отыскивать какие-либо объяснения того, что в микромире господствуют статистические законы. По мнению Фока, «этот факт следует рассматривать как выражение некоторого закона природы, связанного со свойствами атомных объектов...» ([89], стр. 165). Но все-таки желание указать некую конкретную причину статистического характера законов движения микрообъектов остается весьма сильным. И цитированная выше фраза Фока кончается словами: «... в частности, с присущим им корпускулярно-волновому дуализмом». Это замечание Фока мало связано с остальным текстом, но у Омеляновского оно становится основным.

Не уклоняются от попыток указать причины статистического характера квантовой механики Бор и Гейзенберг, хотя они, так же как и Фок, считают вероятностный характер законов микромира первичным.

5. Теперь перейдем к последней, наиболее правильной, по нашему мнению, точке зрения на причины статистического характера квантовой механики. Ее придерживается целиком или отчасти (как одной из вероятных) довольно большое число ученых. Выражается она зачастую по-разному, но в общем-то существо ее едино и заключается в следующем: *в квантовой теории ни один объект не является полностью индивидуализированным, независимым от остального мира.*

В книге Бома, написанной им до того, как он выдвинул гипотезу о скрытых параметрах микрообъектов, говорится: в квантовой механике «...представление о том, что материю возможно представить в виде совокупности отдельных независимых частей, ... заменяется представлением о том, что Вселенная является неделимым целым, отдельные части которого имеют смысл абстракций или приближений, справедливых лишь в классическом приближении» ([60], стр. 170). Эту мысль следует признать полностью справедливой.

Статистический характер квантовой теории связан, образно говоря, с взаимодействием микрообъектов со всем миром. Этим взаимодействием нельзя пренебречь вследствие конечности постоянной Планка. Оно феноменологически включено в уравнение движения микрочастицы. Эта точка зрения развивалась нами в статье «В чем причина статистического характера квантовой механики?» ([102], стр. 147). Ее также последовательно развивают Вассэль в статье [67], Вонсовский и Курсанов [8] и др. Отдельные высказывания Блохинцева говорят о близости его взглядов к указанной точке зрения (см. стр. 244).

Даже у Гейзенберга можно найти высказывание в духе рассматриваемой точки зрения: «Необходимо обратить внимание на то, что система, которую следует рассматривать согласно методам квантовой механики, на самом деле является частью значительно большей системы, в конечном счете — всего мира. Она находится во взаимодействии с этой большой системой, по крайней мере в значительной степени неизвестном. Эта формулировка, несомненно, правильно описывает положение дел, ибо система совсем не могла бы быть предметом измерений и теоретических исследований, если бы она вообще не принадлежала к миру явлений, если бы ее не связывало никакое взаимодействие с большой системой, частью которой является наблюдатель. Взаимодействие с этой большой системой, с ее неизвестными, в значительной степени микроскопическими особенностями, вводит тогда в описание — а именно и в квантовомеханическое, и в классическое описание — новый статистический элемент, который должен быть принят во внимание при рассмотрении системы» ([71], стр. 150).

С данной точки зрения причина статистического характера квантовой механики та же, что и в классической

статистической механике, — наличие большого количества связей, влияющих на движение объекта. Частица, рассматриваемая в квантовой механике как свободная, в действительности свободна только от воздействий динамического характера. Но она находится под действием случайных сил, вызывающих квантовые флуктуации ее поведения, отражаемые соотношением неопределенностей, о чем говорилось выше при обсуждении истолкования принципа неопределенностей.

В самом деле, уравнение Шредингера можно записать в той же форме, что и уравнение движения броуновской частицы, куда входит потенциал «случайных сил». Это сделано в работе Гейликмана «О корпускулярно-волновой аналогии в квантовой механике» [103].

При подстановке в уравнение Шредингера для свободной частицы волновой функции в виде $\Psi = a \exp[(i/\hbar)St]$ мы получим два уравнения — для функции S и для плотности вероятности $\rho = a^2 = |\Psi|^2$:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m} (\nabla S)^2 - \frac{\hbar^2}{4m} \left\{ \frac{\nabla^2 \rho}{\rho} - \frac{1}{2} \frac{(\nabla \rho)^2}{\rho^2} \right\} = 0$$

и

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \left(\rho \frac{\nabla S}{m} \right) = 0.$$

Здесь операторы ∇ , ∇^2 и div имеют следующий смысл:

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

(\mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} — единичные векторы вдоль осей x , y , z);

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; \quad \operatorname{div} \mathbf{b} = \frac{\partial b_x}{\partial x} + \frac{\partial b_y}{\partial y} + \frac{\partial b_z}{\partial z}$$

(\mathbf{b} — произвольный вектор).

Первое уравнение имеет форму классического уравнения Гамильтона — Якоби для функции действия S с некоторой дополнительной потенциальной энергией

$$U' = -\frac{\hbar^2}{4m} \left\{ \frac{\nabla^2 \rho}{\rho} - \frac{1}{2} \frac{(\nabla \rho)^2}{\rho^2} \right\}.$$

Второе уравнение является просто уравнением непрерывности, так как ∇S есть импульс.

Аналогичным образом можно записать в форме Гамильтона — Якоби уравнение движения броуновской частицы:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m} (\nabla S)^2 + mD^2 \left\{ \frac{\nabla^2 \rho}{\rho} - \frac{1}{2} \frac{(\nabla \rho)^2}{\rho^2} \right\} = 0.$$

Соответствующее уравнение непрерывности имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

где ρ — плотность вероятности обнаружения броуновской частицы, а \mathbf{v} — ее усредненная по совокупности скорость. Коэффициент $D = \frac{1}{6} \frac{\overline{\Delta r^2}}{\Delta t}$ не зависит от радиуса-вектора частицы \mathbf{r} и времени t и представляет собой коэффициент диффузии. Таким образом, уравнения движения квантовой и броуновской частиц имеют одинаковую форму, различаясь лишь знаком потенциала случайных сил U' . Вместо коэффициента mD^2 в квантовом уравнении стоит коэффициент — $\hbar^2/4m$.

В квантовой статистике наряду с флуктуациями квантового происхождения, определяемыми величиной \hbar , учитываются и обычные тепловые флуктуации, зависящие от произведения постоянной Больцмана на абсолютную температуру. Именно поэтому квантовая статистика, в отличие от классической, является статистической теорией в двояком значении этого слова.

Если попытаться установить физическую природу случайных воздействий на квантовую частицу, то наиболее естественно связать ее с взаимодействием с вакуумом, которое неизбежно выступает в явной форме в квантовой теории поля. Квантовая частица, можно предположить, взаимодействует с миром через вакуум, т. е. посредством виртуальных частиц. Об этом уже достаточно говорилось ранее, и теперь на данном вопросе мы останавливаться не будем.

Насколько нам известно, серьезной критике такая точка зрения в литературе не подвергалась. Правда, она и не получила общего признания, хотя с теми или иными вариациями довольно часто встречается в литературе. Во всяком случае, нельзя считать серьезной критикой замечание о том, что если в волновой функции неявно учтено взаимодействие с вакуумом, то не нужно

его учитывать дополнительно в явной форме, как это делает Вельтон [104] при расчете лэмбовского сдвига уровней как следствия квантовомеханических флуктуаций электромагнитного поля. Это замечание основано на элементарном недоразумении. В работе Вельтона исходным является классическое уравнение движения электрона, находящегося под действием вторично квантованного электромагнитного поля. В классическом же уравнении, разумеется, никаких квантовых флуктуаций нет. При квантовом расчете того же эффекта дополнительный учет флуктуаций уже не нужен: там они автоматически присутствуют.

Так же неправильно замечание Пахомова [91] о том, что флуктуации вакуума не могут быть ответственными за статистический характер квантовой механики, так как они позволяют объяснить только незначительный дополнительный сдвиг энергетических уровней атома. К сказанному выше можно добавить, что с этими флуктуациями в современной квантовой теории поля связана бесконечная энергия и для получения малых добавок к энергии приходится прибегать к технике перенормировок.

В заключение настоящего параграфа отметим, что если причина статистического характера квантовой механики действительно состоит в неустранимой связи микрообъекта с миром в целом, то, очевидно, предсказать точно наступление какого-либо события, будь то распад элементарной частицы или обнаружение электрона в определенном участке дифракционной картины, невозможно. Для этого надо было бы одновременно и точно установить, как протекают явления во всем мире.

§ 8. О причинах недооценки роли и значения статистических законов

По ходу изложения мы неоднократно касались разного рода причин, приводящих к недооценке значения статистических законов.

Главная причина, по нашему мнению, состоит в методологически неверном подходе к решению проблемы. Нужно прежде всего исследовать, как относятся друг к другу статистические и динамические закономерности современной физики. Вместо этого обычно начинают с определений их сущности, которые уже предreshают исход исследования до того, как к нему надо приступать.

Как правило, в соответствии с исторической последовательностью детально анализируется содержание динамических законов классической механики Ньютона. Отсюда делаются определенные выводы о законах вообще, о причинности и т. д., причем исследование проводится так, как будто автор живет в начале XIX века, когда никакие законы, кроме динамических, не были известны. Начинают обсуждать достоинства динамических законов, совершенно не обращая внимания на главное, а именно на то, что любые фундаментальные динамические законы являются приближением соответствующих статистических законов, описывающих тот же круг явлений, ту же форму движения материи.

Можно проследить на многих примерах, что если автор останавливается в деталях на выяснении и уточнении смысла различных понятий, но говорит, что вначале он будет касаться только динамических законов, а к статистическим перейдет потом, что его рассуждения прямо к статистическим законам не относятся и т. д., то этим фактически уже все предопределено. Далее статью можно и не читать. Автор либо будет утверждать, что динамические законы первичны, либо же в лучшем случае, что динамические и статистические законы равноправны и относятся к различным формам движения, не сводимым друг к другу. В качестве очень наглядного примера подобного подхода можно привести статью Августинена «Физический детерминизм» [105].

В основе подобной методологии лежит уверенность в том, что, отправляясь от одного-двух фактических положений, касающихся сути динамических и статистических законов, можно с помощью простых рассуждений, если они достаточно строги и последовательны, прийти к определенному заключению о соотношении между законами. И это вместо того, чтобы сначала выяснить, как же связаны существующие в современной физике динамические и статистические законы друг с другом. Здесь отчетливо виден метафизический подход к исследованию, берущий начало в те отдаленные времена, когда философы были уверены, что можно усмотреть первопричину всех вещей, размышляя во время прогулки или в кабинете за письменным столом, каким должен быть мир. Как уже говорилось во введении, подобный метод уже давно оставлен в естественных науках, а вот при исследовании общих философских вопросов он по-преж-

нему нередко дает о себе знать, хотя и не предстает в обнаженной форме. При таком подходе к исследованию легко очутиться в плену традиционных, предвзятых мнений. В борьбе с подобным подходом к изучению философских проблем физики автор настоящей книги видит одну из главных ее задач.

Нельзя здесь еще раз не подчеркнуть, что сама терминология, в которой динамическая закономерность называется причинной или детерминистической, с самого начала бросает некую тень на статистические законы, так как подразумевает, что последние уже не могут быть причинными. Не исключено, что именно неудовлетворительная терминология способна сразу направить исследование по неверному руслу. В этом отношении термины «динамический» и «статистический», несомненно, представляются предпочтительными, так как они заранее не предполагают каких-либо общих представлений о сущности закономерностей.

Из отдельных, частных причин, мешающих правильному пониманию характера соотношения динамических и статистических законов, подчеркнем еще следующие.

Отсутствует четкое понимание того, что существуют два аспекта соотношения динамических и статистических законов, которые играют далеко не одинаковую роль. Нельзя смешивать отношение динамических и статистических законов, описывающих одну и ту же форму движения материи, один и тот же круг вопросов, с отношением между законами поведения отдельных объектов и законами поведения их совокупности.

Часто считается, что статистические законы не отражают необходимых связей в природе, а являются «закономерностями случайного». Это сразу принижает их значение и просто несостоятельно, так как любые законы, в том числе и статистические, выражают необходимые связи в природе.

Не вполне правильное понимание сущности и значения знаменитой формулировки классического детерминизма, данной Лапласом, служит еще одной причиной, препятствующей выяснению значения статистических законов. Как уже говорилось, действительная суть лапласовского детерминизма состоит в признании примата динамических законов вообще, а совсем не обязательно примата законов классической механики. Поэтому, когда ученые отрицают всеобъемлющий характер

детерминизма Лапласа, а вслед затем выражают уверенность в том, что в конце концов будут открыты новые динамические законы движения элементарных частиц и с приматом статистических законов на данном отрезке времени будет покончено, то из их высказываний можно сделать лишь один вывод: детерминизм Лапласа отвергается на словах, а на деле пытаются, разумеется безуспешно, провести его в жизнь как всеобщий принцип. Ведь замена классических импульсов и координат любыми новыми параметрами не изменит метафизического характера такого рода детерминизма. Если бы это было до конца осознано, то стала бы ясна и метафизическая окраска любой динамической закономерности, и тогда истинный смысл статистических закономерностей стал бы более прозрачным.

Центр тяжести борьбы с индетерминизмом должен быть перенесен на доказательство того, что наличие *только статистических* законов поведения объекта ни в коей мере не означает отсутствия причинности. Позиция ученых (Бом, де Бройль и др.), отстаивающих причинность путем ссылки на всеобъемлющий характер динамических законов, представляется весьма шаткой.

Статистический закон может выполняться как для коллективов из большого числа частиц, так и для отдельных частиц. Отрицание его справедливости в последнем случае на том основании, что статистическая закономерность может работать только при наличии совокупности идентичных систем, приводит к неверному ограничению сферы применимости статистических закономерностей.

Не последнюю роль в искажении смысла статистических законов играет непонимание того, что динамические элементы (подчинение статистической характеристики системы динамическому закону, выполнение некоторых законов сохранения, носящих динамический характер) присущи всем статистическим законам, как классическим, так и квантовым.

Обо всем этом уже говорилось ранее. Но часто используется еще одно основание для оправдания равноправия динамических и статистических закономерностей. Это так называемая концепция уровней Бома. Ее мы будем обсуждать в следующей главе, посвященной перспективам развития физики.

ГЛАВА VI

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ДИНАМИЧЕСКИМИ И СТАТИСТИЧЕСКИМИ ЗАКОНОМЕРНОСТЯМИ И ОБЩИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

§ 1. Концепция уровней Бом и ее критика

Определенные заключения о соотношении между динамическими и статистическими закономерностями, а также о перспективах развития физики микромира делает Бом на основании концепции уровней. Суть ее изложена в цитированной ранее книге «Причинность и случайность в современной физике».

Мы уже говорили о том, что Бом эволюционировал от признания первичности динамических законов к утверждению полного равноправия динамических и статистических законов. Однако целиком освободиться от предвзятого отношения к статистическому типу закономерности ему не удалось. Главная причина этого, по нашему мнению, заключается в нежелании видеть в статистических законах отражение необходимых связей в природе. Бом упорно именует статистические законы законами «случайного».

Свое мнение о равноценном значении законов обоих типов Бом основывает на качественной бесконечности природы. Именно вследствие этой качественной бесконечности ни один из типов законов в силу своей односторонности, утверждает он, не может дать полного представления о реальных процессах. Здесь опять-таки Бом считает, что динамические и статистические законы учитывают необходимые и случайные факторы соответственно. В действительности же ни одна фундаментальная физическая теория не содержит таких динамических

законов, которые более полно отражали бы определенные стороны природы, чем соответствующие статистические законы. Природа качественно бесконечна, и ни один закон не способен исчерпывающе описать течение любого процесса. Но в каждом конкретном случае статистические законы наиболее полно отражают действительность.

По мнению Терлецкого, отсутствие примата одной формы закона над другой вытекает из концепции уровней; сам Бом прямо этого не говорит. Сущность концепции уровней в интересующем нас отношении состоит в том, что по мере уточнения наших знаний, по мере перехода ко все более и более глубоким уровням динамические законы последовательно замещаются статистическими и, наоборот, статистические — динамическими. Причем эти уровни и, соответственно, законы могут относиться к разным формам движения материи, к явлениям разного круга.

Продемонстрировать суть концепции уровней и показать значение в ней закономерностей обоих типов можно следующим образом. На макроскопическом, крупномасштабном, уровне мы имеем дело с усредненным поведением систем, состоящих из огромного числа частиц. Законы здесь носят динамический («причинный» по терминологии Бома) характер. Это законы термодинамики, макроскопической электродинамики Максвелла и др. Более точное рассмотрение с учетом случайных отклонений от среднего дается на микроскопическом уровне. Это более глубокий уровень, на котором учитывается дискретное строение вещества. Здесь господствуют статистические законы. Если же мы обратимся к законам движения отдельных молекул и атомов, то обнаружим, что их поведение достаточно точно описывается динамическими законами классической механики.

Исследуя более детально движение атомов и молекул, их строение, поведение слагающих атомы элементарных частиц и взаимодействие последних с электромагнитным полем, мы приходим к квантовому уровню, более глубокому, чем механический. Законы здесь имеют статистический характер как для движения частиц вещества, имеющих массу покоя, так и для квантов электромагнитного поля.

Далее, полагает Бом, должен существовать некий новый (более глубокий) *субквантовый* уровень, законы которого опять будут динамическими.

Вследствие чередования законов: динамический — статистический — динамический и т. д. — ни одному из типов закономерностей, по Бому, нельзя отдать предпочтение.

Однако, по нашему мнению, схема Бомы отнюдь не доказывает равноправия динамических и статистических законов. Достаточно обратить внимание на уже неоднократно подчеркнутое нами обстоятельство. Для каждой формы движения материи, для каждого круга явлений, для одного, так сказать, объекта в схеме уровней Бомы мы имеем законы двух типов: динамического и статистического. И для каждого объекта схемы уровней статистические законы лучше отражают действительность, чем динамические. Именно в этом и состоит основополагающая роль статистических законов. С развитием науки открываются новые, неизвестные ранее явления, формы движения материи. Но для всех открытых на сегодняшний день форм движения материи положение именно таково.

Отметим теперь, что концепция уровней не выглядит такой уж естественной и стройной, как может показаться на первый взгляд. Так, далеко не во всех случаях выдерживается одна и та же неизменная последовательность уровней. Так, для систем, для которых неприменима классическая статистика (справедлива только квантовая статистика), выпадает «динамический уровень», соответствующий классической механике. Сильные и слабые взаимодействия могут рассматриваться только на квантовом и, следовательно, статистическом уровне и т. д.

Далее, можно в принципе допустить возможность существования субквантового уровня со своими специфическими законами. Гораздо менее вероятно, что эти законы окажутся динамическими. Но пусть даже так. Все равно это опять-таки не будет означать, что в основе статистических квантовых законов лежат некоторые динамические законы. По аналогии с предыдущим, учитывая более совершенную форму статистического закона (диалектическое выражение необходимости), можно утверждать: на первом этапе, в первом приближении, мы будем иметь динамические законы субквантового уровня, но на следующем этапе познания для тех же явлений будет найден более глубокий, статистический закон.

Впрочем, можно выдвинуть серьезные возражения вообще против существования субквантового уровня.

Совокупность всех экспериментальных фактов, как уже говорилось ранее, дает основания рассматривать известные элементарные частицы как единственно возможные формы существования материи, не расчленимые уже далее. Материя, несомненно, бесконечно сложна, но ее сложность связана не с бесконечной делимостью, не с бесконечным чередованием все более и более глубоких уровней. Сложность материи заключается в неисчерпаемости свойств элементарных частиц.

Наконец, сделаем еще несколько замечаний по поводу приведенных ранее утверждений Бома о равноправии закономерностей двух типов (см. стр. 186). Справедливо, что динамический закон возникает как приближение к описанию усредненного поведения большой совокупности элементов, претерпевающих неупорядоченные флуктуации. Его, безусловно, всегда можно получить из статистического как некоторое приближение. Однако обратное уже не справедливо.

Хотя статистические законы в некоторых случаях (например, в классической статистической механике) и можно рассматривать в определенном смысле как статистическое приближение «к действию большого количества причинных факторов, движущихся существенно независимо» ([1], стр. 207), отсюда отнюдь не следует, что статистические законы можно получить из динамических как приближение. Формулировка Бома говорит лишь о том, что наличие статистического закона не свидетельствует об отсутствии причин, а, наоборот, означает их обилие. Несводимость же статистических законов поведения совокупности к динамическим законам поведения ее отдельных индивидуумов вытекает из рассмотренной ранее несводимости высших форм движения материи к низшим.

Бом считает, что подобно тому, как отсутствие учета флуктуаций в динамических законах может привести к ошибкам, «некритическое применение случайных законов (опять та же неудачная терминология! — Г. М.) при пренебрежении возможностью поправок на причинные взаимосвязи... может так же привести к ошибочным результатам» ([1], стр. 206). Бом не замечает, как нам представляется, существенного различия между обеими ситуациями. Учет флуктуаций приводит к появлению закономерности принципиально нового типа — статистической. Учет же новых причинных факторов происходит

в рамках закономерности одного типа; он не меняет статистического характера самой закономерности и приводит лишь к ее уточнению. Уравнения дополняются новыми членами и т. д.

Например, спин электрона можно рассматривать как дополнительный фактор, дополнительную причину, влияющую на поведение электрона. Однако введение спина в теорию было произведено Паули сравнительно простым путем: введением нового оператора и двухкомпонентной волновой функции вместо однокомпонентной. Переход от нерелятивистской квантовой механики к релятивистской также не затронул общего статистического характера теории.

Мы неоднократно уже подчеркивали, что если динамическим законам совершенно чужды элементы случайного, характерные для статистических законов, то любой статистический закон содержит в себе элементы сугубо динамической природы. Так, сама вероятность в статистических законах подчиняется законам динамического типа. Именно поэтому статистические средние с необходимостью вытекают из определенных условий, в которых находится система.

В заключение подчеркнем, что выдвижение статистических законов на первый план не исключает возможности открытия новых форм движения материи, для которых на первом, и только на первом, этапе будут найдены новые динамические законы. Мы можем только утверждать, что любая форма движения материи более полно описывается статистическими законами, как высшей формой закономерности, учитывающей диалектику необходимых связей в природе.

§ 2. Возможна ли динамическая теория движения элементарных частиц?

Динамический закон для движения элементарных частиц, конечно, возможен. И он давно уже открыт. Мы имеем здесь в виду уравнение движения Ньютона, справедливое при условии, что действие $S \gg \hbar$. Это условие выполняется при движении частиц большой энергии в медленно меняющихся полях (ускорители, электронные лампы и т. д.). Но в квантовой области динамическое уравнение движения уже не может существовать. При

$S \sim \hbar$ движение элементарных частиц всегда будет описываться статистическими законами.

В настоящее время мы не располагаем логически завершенной теорией элементарных частиц, лишенной внутренних противоречий. Очевидно, что такая теория рано или поздно будет построена. И если пути отыскания более совершенной теории пока не найдены, то во всяком случае очевидно, что эта теория не может быть динамической. Надеяться на отыскание новых динамических законов в этой области столь же нелогично, как и пытаться, к примеру, найти для поведения совокупности частиц, подчиняющихся классической статистике, динамические законы, которые были бы точнее известных статистических законов. Или, скажем, пытаться построить динамическую теорию движения броуновской частицы.

Переход от статистического закона к динамическому для данной формы движения материи никогда не был и не будет возможным. Коль скоро поведение частицы или системы объективно обнаруживает элементы случайного и они существенны, учесть их в рамках динамического закона невозможно, ибо он для этого не приспособлен. С философской точки зрения это означает возможность (и неизбежность) перехода от метафизического представления необходимости в динамических законах к более глубокому диалектическому в статистических, но не обратно.

В связи с этим нельзя ни в коем случае согласиться с Бомом, когда он называет утверждение о принципиально статистическом характере движения элементарных частиц «индетерминистическим механицизмом». Статистическое поведение индивидуальных частиц является фактом, не отвергаемым и самим Бомом.

Бом представляет дело так, будто утверждение о принципиально статистическом характере теории является тормозом науки, навязанным извне догматизмом, отказом от представления о бесконечной сложности природы. Между тем необходимость построения новой теории, связанной с отказом от ряда существующих положений, ясна всем. Поиски такой теории ведутся на разных путях, причем подавляющее большинство ученых не сомневается в статистическом характере будущей теории. И неужели, например, попытка построения единой теории поля Гейзенбергом и др. — это проявление догматизма в науке, а не многообещающее начинание?

Статистическая теория элементарных частиц, несомненно, будет построена. Существование же субквантового уровня, подчиняющегося динамическим законам, хотя в принципе и возможно, но очень маловероятно. Действительно, поставим следующий вопрос: может ли быть справедливым динамический закон для описания взаимодействия, к примеру, заряженной частицы с отдельным квантом электромагнитного поля, подобно тому как для описания взаимодействия броуновской частицы с отдельной молекулой справедлив закон Ньютона, вообще говоря, неприменимый к движению броуновской частицы? Подчеркнем, что, независимо от возможности существования такого закона, наш основной тезис о более глубоком отражении реальных процессов статистическими законами, нежели динамическими, остается в силе. Здесь ведь речь идет не о динамическом уравнении движения, дающем изменение состояния движения частицы с течением времени. При взаимодействии заряженной частицы с квантом электромагнитного поля имеет место иная форма движения материи, подобно тому как движение в механике Ньютона и броуновское движение принадлежат к различным формам движения материи. Броуновское движение — это тепловое движение, интенсивность которого зависит от температуры.

Можно с полным основанием поставить под сомнение существование динамического закона взаимодействия заряженной частицы с квантом электромагнитного поля. Ведь если имеется непрекращающееся взаимодействие электрона со «средой» — электромагнитным вакуумом, то динамическое рассмотрение отдельного взаимодействия по самому своему смыслу подразумевает независимость этого взаимодействия от наличия множества других взаимодействий того же типа. Никаких оснований для этого нет. Как уже упоминалось ранее, согласно принципу неопределенностей движение электрона на бесконечно малом отрезке рассматривать нельзя. Кроме того, вообще нельзя представить себе ни с чем не взаимодействующий электрон, электрон без электромагнитного поля, так как тогда надо считать его электрический заряд равным нулю. Но, рассматривая взаимодействие электрона с отдельным квантом поля, нужно иметь дело по самому смыслу задачи с электроном до взаимодействия с квантом (т. е. с абсолютно свободным электроном) и после взаимодействия.

Наконец, согласно квантовой теории, по сути дела, нельзя говорить об индивидуальных частицах и тем более об индивидуальных квантах электромагнитного поля. Это обстоятельство (оно представляется нам наиболее важным), особенно отчетливо выступающее в современной квантовой электродинамике при больших энергиях, уже давно подчеркивалось Ланжевенем.

Таким образом, анализ соотношения между динамическими и статистическими законами приводит к выводу о полной бесперспективности попыток отыскания динамических законов движения элементарных частиц. Во всяком случае, материалистическая интерпретация квантовой механики не нуждается в допущении основополагающей роли динамических законов.

§ 3. Статистические теории и познаваемость мира

Если действительно статистический закон глубже отражает объективную реальность, чем динамический, и если, соответственно, нельзя надеяться, что после обнаружения статистического закона движения элементарных частиц можно будет сформулировать более глубокий динамический закон, то возникает естественный вопрос: не означает ли это наличия некоторых границ познаваемости мира? Ведь с помощью статистического закона нельзя однозначно предсказать определенные значения различных физических величин типа координаты и импульса электрона и других частиц.

На самом деле, разумеется, ничего подобного не вытекает из признания первичности статистических законов. Нет никаких принципиальных преград для исследования движения элементарных частиц, для возможностей предсказания деталей их поведения.

Достижение абсолютно точного знания поведения элементарных частиц означает достижение абсолютной истины в вопросе, относящемся к механике элементарных частиц. Марксистская диалектика рассматривает абсолютную истину как принципиально достижимую, т. е. утверждает отсутствие каких-либо определенных преград для познания. Однако вследствие бесконечной сложности, бесконечного развития природы мы можем только асимптотически приближаться к абсолютной истине, и этот процесс никогда не будет завершен полностью. Диалектика рассматривает познание абсолют-

ной истины как бесконечный, непрекращающийся и не могущий прекратиться процесс.

Принципиальная достижимость абсолютной истины выражается реально в том, что различные законы, открываемые наукой, все более и более точно отображают объективную реальность, являются различными ступенями познания. Из этих частных закономерностей постепенно и складывается абсолютная истина.

Так же обстоит дело и с законами, описывающими механическое движение элементарных частиц. В этом нет ничего нового; общее положение можно приложить к частному случаю. Новое, вытекающее из анализа статистической закономерности, заключается в том, что исчерпывающее знание поведения одной частицы требует не только полного знания свойств отдельных частиц, но и знания движения всех частиц мира. К этому заключению приводит квантовая механика, и оно означает невозможность ни сейчас, ни в будущем однозначно предсказывать значения переменных, характеризующих состояние частицы. Гейзенберг по этому поводу пишет: «В конечном счете проследить количественную цепь причин и следствий можно было бы, только включив весь мир в систему, но тогда физика уже исчезла и осталась только одна математическая схема» ([66], стр. 48).

Сторонники возможности создания новой динамической теории движения микрообъектов (де Бройль и др.) полагают, что для более точного предсказания поведения электрона достаточно более точно знать его свойства. Поэтому они и считают, что ступенями познания, ведущими все ближе и ближе к истине, могут быть динамические законы, которые становятся все более и более точными по мере развития науки. Они полагают, что при той точности, с которой в настоящее время регистрируется положение частиц, достаточно более детального знания их свойств, чтобы можно было в пределах ошибки современного эксперимента однозначно предсказать поведение частиц. Учет же взаимодействия с внешним окружением может дать только несущественные поправки. Вот, в сущности, на каком основании покоится уверенность в мощи и основополагающем значении динамических законов.

Но для элементарных частиц, по всей вероятности, универсальность взаимодействия выступает непосредственно. С этим связана статистичность теории и

необходимость для уточнения характера движения данной частицы все точнее учитывать движение всех остальных частиц мира. Для достижения абсолютной истины в исследовании поведения одной частицы необходимо точное знание движения всех частиц. Отсюда же вытекает и сохранение статистичности теории и при дальнейшем ее развитии. Абсолютно точное знание движения частиц — это недостижимый предел. Возможность его достижения никогда не перейдет в действительность вследствие бесконечной сложности Вселенной.

Но не означает ли все сказанное возврата к тому самому лапласовскому детерминизму, который мы отрицаем? Нет!

Концепция Лапласа с ее динамическими законами игнорирует понимание истины как реального процесса познания и не в состоянии дать правильного представления о направлении развития науки. Суть здесь совсем не в том, что динамические законы движения уже известны для отдельных объектов и теперь достаточно лишь обладать сверхмощным умом, который в состоянии охватить все начальные условия и решить соответствующую систему бесконечного числа бесконечно длинных уравнений. Наше рассмотрение позволяет выявить реальные тенденции развития науки, рассматривая абсолютную истину как процесс.

Можно допустить, что дальнейший прогресс в теории элементарных частиц будет связан как с уточнением их свойств, так и с уточнением влияния на них окружения в рамках статистической закономерности. В ближайшее время, вне сомнений, прогресс теории будет связан с дальнейшим уточнением свойств самого объекта, с изучением структуры элементарных частиц. Но в принципе не исключено, что развитие науки пойдет и по пути более точного и более явного учета случайных внешних воздействий на данный объект. Теория, оставаясь статистической, может оказаться способной все точнее и точнее учитывать как свойства самого объекта, так и влияние на его поведение движения и свойств других частиц, как реальных, так и виртуальных. Никаких принципиальных преград на пути к достижению абсолютной истины в отношении движения элементарных частиц не существует.

ГЛАВА VII

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем в заключение основные утверждения нашего исследования, которые мы считаем достаточно строго доказанными. Наряду с этим перечислим также вопросы, о которых весьма подробно говорилось в работе, но которые нельзя считать решенными.

Доказанными мы считаем следующие утверждения.

1. Существует два аспекта проблемы соотношения динамических и статистических закономерностей в физике. В первом аспекте соотношение между ними выступает в следующем плане: законы поведения индивидуальных объектов имеют динамический характер, поведение же большой совокупности этих объектов подчиняется статистическим законам. Второй аспект — это соотношение между динамическими и статистическими законами, описывающими один и тот же круг явлений, одну и ту же форму движения материи.

2. Первый аспект проблемы не является основным. Он фактически сводится к вопросу о соотношении низших и высших форм движения материи. Законы поведения как индивидуальных объектов, так и их коллективов могут быть статистическими (например, квантовая механика — квантовая статистика).

3. Из рассмотрения главного (второго) аспекта проблемы вытекает, что *динамические законы представляют собой первый, низший этап в процессе познания окружающего нас мира, статистические законы обеспечивают более совершенное отображение объективных связей в природе: они выражают следующий, более высокий этап познания.*

4. Статистические законы, как и динамические, выражают необходимые связи в природе, причем в первых

необходимость выступает диалектически, в неразрывной связи со случайным. В этом состоит философское обоснование того, что статистические законы более глубоко и верно отражают действительность, чем динамические.

5. Любой статистический закон содержит в себе элементы динамического характера. В первую очередь это проявляется в том, что функция распределения в статистической механике или вектор состояния в квантовой механике подчиняются законам динамического типа. Часть законов сохранения также следует рассматривать как динамические элементы статистической теории.

6. При дальнейшем развитии физики элементарных частиц попытки отыскания динамических законов их движения бесперспективны. Только статистическая теория способна описать поведение микрообъектов в квантовой области.

Остаются дискуссионными следующие важные вопросы.

1. Исчерпывает ли проблему причинности в физике утверждение: начальное состояние системы при заданной энергии взаимодействия однозначно определяет ее конечное состояние?

Мы склоняемся к мнению, что в статистических законах следует сохранить также понятие качественной, или наглядной, причинности, обуславливающей реализацию того или иного значения случайной величины.

2. Если вопрос о причинах статистического характера классических теорий в основном ясен (с той оговоркой, что сам вопрос должен быть сформулирован корректно: почему оказываются несправедливыми более простые динамические законы?), то причины статистического характера квантовой механики остаются дискуссионными. Нам представляется наиболее правильной точка зрения, согласно которой статистический характер поведения микрообъектов обусловлен универсальностью взаимодействия их с окружающим миром, в частности с вакуумными флуктуациями полей.

Но не исключено, что сама постановка вопроса о причинах статистического характера квантовых законов бессодержательна, так как они являются самыми фундаментальными законами природы.]

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Б о м, Причинность и случайность в современной физике, ИЛ, 1959.
2. И. А. Акчури н, Ю. В. С а ч к о в, Вопросы философии, № 9, 134 (1958).
3. В. А. Ф о к, УФН 62, 464 (1957).
4. Ю. Н. Д е м к о в, Т. Л о ш а к, Вопросы философии, № 5, 157 (1957).
5. P. L a n g e v i n, Statistique et determinisme, Comptes Rendus du 3 an 8 Juin 1935, Paris, Presse universitaire, 1944.
6. Я. П. Т е р л е ц к и й, Динамические и статистические законы физики, изд. МГУ, 1950.
7. Сборник «Проблемы причинности в современной физике», Изд. АН СССР, 1960.
8. С. В. В о н с о в с к и й, Г. А. К у р с а н о в, Вестник АН СССР, № 4, 31 (1957).
9. Г. Я. М я к и ш е в, Вопросы философии, № 6, 108 (1958).
10. А. С. М о н и н, Вопросы философии, № 4, 127 (1959).
11. А н д е р с о н, в сб.: «Гравитация и относительность», «Мир», 1965, стр. 302.
12. Г. К а л л е н, Дж. Г о р в и ц, УФН 107, 489 (1972).
13. А. Я. Х и н ч и н, Математические основания квантовой статистики, Гостехиздат, 1951.
14. В. И. Г р и г о р ь е в, Г. Я. М я к и ш е в, Вестник МГУ, сер. мат., мех., аст., физ., хим., № 6, 71 (1958).
15. Д. Д. И в а н е н к о, А. А. С о к о л о в, Классическая теория поля, Гостехиздат, 1949.
16. В. Г е й з е н б е р г, Введение в единую полевую теорию элементарных частиц, «Мир», 1968.
17. Ю. М. Ш и р о к о в, И. А. Р о з а н о в, М. И. Х а р а х а н, Труды Международного совещания по нелокальной квантовой теории поля, Дубна, 1967, стр. 170.
18. Е. В и г н е р, УФН 85, 727 (1965).
19. Я. Б. З е л ь д о в и ч, УФН 86, 303 (1965).
20. Я. Б. З е л ь д о в и ч, И. Д. Н о в и к о в, Релятивистская астрофизика, «Наука», 1967.
21. Н. С. К р ы л о в, Работы по обоснованию статистической физики, Изд. АН СССР, 1950.
22. Л. Д. Л а н д а у, Е. М. Л и ф ш и ц, Статистическая физика, «Наука», 1964.
23. Д. Т е р - Х а р, УФН 59, 619 (1956).

24. Б. С. Давыдов, ЖЭТФ 17, 485 (1947).
25. Д. Честер, Теория необратимых процессов, «Наука», 1966.
26. L. Van Nove, The Theory of Neutral and Ionized Gases, N. Y., 1960, p. 194.
27. Е. М. Лифшиц, И. М. Халатников, УФН 80, 391 (1963).
28. Ф. Хойл, Галактики, ядра, квазары, «Мир», 1968.
29. Я. Б. Зельдович, УФН 96, 209 (1968).
30. А. С. Монин, А. М. Яглом, Статистическая гидромеханика, ч. I, «Наука», 1965, стр. 12.
31. И. В. Кузнецов, Принцип соответствия и его философское значение, Гостехиздат, 1948.
32. Б. Рассел, Человеческое познание, ИЛ, 1957, стр. 358.
33. М. Борн, Физика в жизни моего поколения, ИЛ, 1963.
34. Д. И. Блохинцев, Принципиальные вопросы квантовой механики, «Наука», 1966.
35. Р. Мизес, УФН 10, 447 (1930).
36. Л. Бриллюэн, Научная неопределенность и информация, «Мир», 1966.
37. Ю. Н. Демков, Вопросы философии, № 5, 157 (1957).
38. Г. Я. Мякишев, в сб.: «Философские вопросы естествознания», изд. МГУ, 1959, стр. 32.
39. А. И. Иванов, Е. В. Миронова, В. С. Солосин, В. П. Филосовов, И. А. Хохулина, Философские науки, № 2, 152 (1961).
40. Н. Киселева, К. Медведев, П. Федоренко, Вестник МГУ, сер. VIII, № 6, 79 (1960).
41. М. Н. Руткевич, С. С. Шварц, Г. С. Осипов, Вопросы философии, № 9, 146 (1961).
42. Л. Б. Баженков, в сб.: «Философия естествознания», вып. 1, Госполитиздат, 1960.
43. Р. Фейнман, в сб.: «Вопросы причинности в квантовой механике», ИЛ, 1955, стр. 167.
44. Л. С. Полак (ред.), в сб.: «Вариационные принципы в механике», Физматгиз, 1959, стр. 784.
45. А. Эддингтон, Пространство, время и тяготение, Матезис, Одесса, 1923, стр. 176.
46. Р. Фейнман, А. Хиббс, Квантовая механика и интегралы по траекториям, «Мир», 1968.
47. М. Борн, УФН 69, 173 (1959).
48. E. Vogel, Introduction geometrique à quelques physiques, Gautier-Villars, 1914.
49. К. Маркс, Ф. Энгельс, Сочинения, т. 20, Госполитиздат, 1961, стр. 533, 534.
50. П. Лаплас, Опыт философии теории вероятностей, 1908.
51. Ф. Франк, Философия науки, ИЛ, 1960.
52. К. Маркс, Ф. Энгельс, Сочинения, т. 20, Госполитиздат, 1961, стр. 620.
53. В. И. Ленин, Сочинения, т. 21, Госполитиздат, 1948, стр. 50.
54. К. Маркс, Ф. Энгельс, Сочинения, т. 25, ч. I, Госполитиздат, 1961, стр. 238, 239.
55. В. С. Немчинов, Вопросы философии, № 6, 20 (1955).
56. К. Форд, Мир элементарных частиц, «Мир», 1965, стр. 112.
57. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Квантовая механика, Физматгиз, 1963.

58. Д. И. Б л о х и н ц е в, Основы квантовой механики, «Высшая школа», 1961.
59. Л. Ш и ф ф, Квантовая механика, ИЛ, 1959, стр. 18.
60. Д. Б о м, Квантовая теория, «Наука», 1965.
61. Э. Ф е р м и, Квантовая механика, «Наука», 1965, стр. 103.
62. А. С. Д а в ы д о в, Квантовая механика, Физматгиз, 1963.
63. Н. Б о р, Атомная физика и человеческое познание, ИЛ, 1961.
64. Л. И. М а н д е л ь ш т а м, И. Е. Т а м м, Изв. АН СССР, сер. физ. 9, 122 (1945).
65. В. А. Ф о к, Н. С. К р ы л о в, ЖЭТФ 17, 93 (1947).
66. В. Г е й з е н б е р г, Физические принципы квантовой теории, Гостехиздат, 1932.
67. Ж. В а с с э л ь, в сб.: «Вопросы причинности в квантовой механике», ИЛ, 1955, стр. 122.
68. Б. М. В у л, Вопросы философии, № 3, 165 (1949).
69. А. А. С о к о л о в, В. С. Т у м а н о в, ЖЭТФ 30, 802 (1956).
70. Р. Ф е й н м а н, Р. Л е й т о н, М. С э н д с, Фейнмановские лекции по физике, ч. 3, «Мир», 1965, стр. 228, 229.
71. В. Г е й з е н б е р г, Физика и философия, ИЛ, 1963.
72. Ю. М. Ш и р о к о в, ДАН СССР 111, 1223 (1956).
73. Ю. М. Ш и р о к о в, Лекции по основам релятивистской квантовой теории, НГУ, Новосибирск, 1964 (ротапринт).
74. Д. И. Б л о х и н ц е в, Пространство и время в микромире, «Наука», 1970, стр. 261 и др.
75. А. Э й н ш т е й н, Б. П о д о л ь с к и й, Н. Р о з е н, УФН 16, 440 (1936).
76. Н. Б о р, УФН 16, 446 (1936).
77. Н. Б о р, УФН 66, 571 (1958).
78. А. Э й н ш т е й н, в сб.: «Эйнштейн и современная физика», Гостехиздат, 1956, стр. 66, 67.
79. А. Э й н ш т е й н, в сб.: «Философские вопросы современной физики», Изд. АН СССР, 1959, стр. 230.
80. Л. И. М а н д е л ь ш т а м, Полное собрание трудов, т. V, Изд. АН СССР, 1950.
81. А. Д. А л е к с а н д р о в, ДАН СССР 84, 258 (1952).
82. Д. Б о м, в сб.: «Вопросы причинности в квантовой механике», ИЛ, 1955, стр. 74.
83. D. B o h m, Y. A h n o n o v, Phys. Rev. 108, 1070 (1957).
84. C. S. W u, J. S h a k n o v, Phys. Rev. 77, 136 (1950).
85. В. А. Ф о к, УФН 59, 116 (1956).
86. Г. Я. М ы к и ш е в, в сб.: «Вопросы истории физико-математических наук», «Высшая школа», 1963, стр. 429.
87. В. Г е й з е н б е р г, в сб.: «Нильс Бор и развитие физики», ИЛ, 1958, стр. 42.
88. В. А. Ф о к, УФН 62, 46 (1957).
89. В. А. Ф о к, в сб.: «Философские вопросы современной физики», Изд. АН СССР, 1959, стр. 154.
90. С. А м с т е р д а м с к и й, в сб.: «Закон, необходимость, вероятность», «Прогресс», 1967.
91. Б. Я. П а х о м о в, Вопросы философии, № 10, 105 (1961).
92. А. Я. Х и н ч и н, в сб.: «Философские вопросы современной физики», Изд. АН СССР, 1952, стр. 522.
93. А. Я. Х и н ч и н, Вопросы философии, № 1; № 2, 89 (1961).

94. Ю. В. С а ч к о в, Введение в вероятностный мир, «Наука», 1971.
95. М. С м о л у х о в с к и й, УФН 7, 329 (1927).
96. D. B o h m, Phys. Rev. 85, 166 (1952).
97. К. В. Н и к о л ь с к и й, Квантовые процессы, Гостехиздат, 1940, стр. 27.
98. А. Э й н ш т е й н, Л. И н ф е л ь д, Эволюция физики, Гостехиздат, 1948, стр. 253.
99. В. Г е й з е н б е р г, Философские принципы атомной физики, ИЛ, 1953, стр. 8.
100. Д. И. Б л о х и н ц е в, в сб.: «Философские вопросы современной физики», Изд. АН СССР, 1959, стр. 354.
101. В. А. Ф о к, УФН 45, 6 (1951).
102. Г. Я. М я к и ш е в, Вопросы философии, № 6, 147 (1954).
103. Б. Т. Г е й л и к м а н, ЖЭТФ 17, 830 (1947).
104. Т. В е л ь т о н, в сб.: «Вопросы причинности в квантовой механике», ИЛ, 1955, стр. 269.
105. З. А в г у с т и н е н, в сб.: «Закон, необходимость, вероятность», «Прогресс», 1967, стр. 109.
106. Н. Н. Б о г о л ю б о в, Проблемы динамической теории в статистической физике, Гостехиздат, 1946.
107. Я. П. Т е р л е ц к и й, в сб.: «Философские вопросы современной физики», Изд. АН СССР, 1952, стр. 437.

Цена 96 коп.