

В.С.БАРАШЕНКОВ

**Проблемы
субатомного
пространства
и времени**



МОСКВА · АТОМИЗДАТ · 1979

Барашенков В. С. **Проблемы субатомного пространства и времени.** — М.: Атомиздат, 1979, 200 с.

Книга посвящена детальному обсуждению физического и философского аспектов пространственно-временных отношений микромира. Рассмотрены экспериментальный статус проблемы, ее современное теоретическое состояние и возможности различных обобщений: сверхсветовые скорости сигналов, нелинейные подходы, попытки квантования пространства и времени, геометродинамические концепции. Особое внимание уделено микропричинности и связи свойств пространства — времени с законами сохранения.

Книга рассчитана на преподавателей вузов и научных работников, физиков и философов, интересующихся фундаментальными вопросами современного естествознания и их философской интерпретацией, а также на студентов старших курсов физических, физико-математических и философских факультетов, знакомых с основными положениями релятивистской и квантовой физики.

Рис. 31. Список литературы 299 наименований

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный этап развития физики микроявлений характеризуется необычайным притоком новых экспериментальных данных. Широкое применение счетно-решающих устройств позволило в значительной степени автоматизировать процессы измерений и первичную обработку их результатов. Эксперимент сейчас часто опережает теорию, и большое число экспериментальных фактов находит лишь феноменологическую или, в лучшем случае, полуфеноменологическую, грубомодельную интерпретацию.

В современной теории микроявлений сложилось удивительное положение. С одной стороны, все эксперименты, связанные с электромагнитными взаимодействиями, теория объясняет с колоссальной точностью (до девятого-десятого знака), с другой стороны, многие реально конечные величины — масса, заряд, магнитный момент — оказываются в теории бесконечными, а строгие «полевые уравнения», описывающие взаимодействия мезонов и барионов, вообще не решаются, и для описания экспериментальных данных используют различные и часто плохо согласующиеся друг с другом модельные подходы. Процедура перенормировки, позволяющая успешно исключать из рассмотрения расходящиеся выражения в квантовой электродинамике, совершенно непригодна во многих других случаях; теория оказывается внутренне противоречивой. В то же время в качественном отношении экспериментальные данные не противоречат известным физическим представлениям.

В чем здесь дело? Может быть, в том, что не достает какой-то кардинальной физической идеи, которая позволила бы сформулировать новые закономерности и количественно описать все многообразие экспериментальных фактов, или, может быть, дело просто в том, что мы еще не научились решать сложную зацепляющуюся систему операторных полевых уравнений?

В этих условиях особое значение приобретает критический анализ основ наших физических представлений. Понятно, что такой анализ неизбежно затрагивает общеметодологические принципы и категории. Физический и философский аспекты исследования оказываются здесь чрезвычайно тесно связанными, практически слитными. Поэтому не случаен большой интерес, который прояв-

ляется в настоящее время физиками к философским проблемам естествознания.

Предлагаемая вниманию читателей книга посвящена детально-му обсуждению физического и философского аспектов пространственно-временных отношений микромира. Это один из центральных и наиболее актуальных вопросов современной науки, с которым в той или иной степени связаны фактически все известные сейчас фундаментальные проблемы физики микромира.

В последние годы было издано несколько интересных монографий, в которых обсуждаются различные свойства микроскопического пространства и времени (см. [1–6]). Однако вопрос настолько сложен и многогранен, что многие очень важные его стороны остались нерассмотренными. Автор надеется, что новая книга в определенной степени восполнит такие пробелы, тем более что развитие в этой области происходит чрезвычайно быстро: появляются новые экспериментальные данные, возникают новые точки зрения и ... много новых вопросов. Правда, прогресс современной физики настолько стремителен, что часть материала оказывается устаревшей уже в момент выхода книги в свет.

С начала нашего века минимально доступные экспериментальному исследованию пространственно-временные интервалы уменьшились более чем в миллиард раз: от молекулярно-атомных расстояний и длительностей $\Delta x \approx 10^{-8}$ см, $\Delta t \approx 10^{-18}$ сек до ультрамальных масштабов $\Delta x \approx 10^{-17}$ см, $\Delta t \approx 10^{-27}$ сек в современных опытах с космическим излучением. Утратили смысл и стали неприменимыми многие образы и понятия, выработанные на основе обычного, макроскопического опыта и существенно определившие весь строй нашего мышления — то, что принято называть здравым смыслом. Описание физических явлений приобретает все более «ни на что не похожий» абстрактный вид, который порой кажется просто противоречащим «здравому смыслу». В теоретических построениях все более существенной становится роль методологического элемента. В этой связи особую остроту приобретает ряд вопросов касающихся взаимоотношений «чистой» физики и философии: каковы задачи философии в естествознании; может ли философия как самостоятельная наука выработать внутри себя какие-либо критерии и указания, помогающие естественно-научному исследованию и каким-то образом ориентирующие его, или же роль философии сводится всего лишь к интерпретации и осмысливанию уже полученных результатов; имеют ли право на существование философские гипотезы или же это во всех случаях равнозначно переходу на позиции натурфилософии? Мы перечислили только часть возникающих вопросов. Тот или иной ответ на них может оказать весьма заметное влияние на выбор направления исследований и проявиться в определенном подходе к интерпретации наблюдавшихся явлений. Рассмотрению перечисленных и некоторых других важных для дальнейшего изложения вопросов посвящено введение к книге.

При обсуждении свойств пространства и времени следует четко различать *реальные*, физические пространство и время, объективно существующие вне и независимо от нас, и *концептуальные* пространство и время, являющиеся отражением двух первых в наших теориях и представляющие собой естественно-научные понятия о пространстве и времени. Очень важно также ясно отдавать себе отчет в том, что концептуальные пространство и время хотя и представляют собой отражение определенных сторон объективной реальности, но всегда в определенной степени абстрактны, а часто содержат и весьма значительный гипотетический элемент.

Это обстоятельство достаточно очевидно, когда речь идет об абстрактных математических понятиях пространства, но с гораздо большим трудом осознается (а иногда и вообще забывается) при рассмотрении согласующихся с опытом физических теорий. Поэтому в книге особое внимание уделено современному состоянию эксперимента.

Обсуждение начинается с выяснения вопросов о том, какие пространственно-временные интервалы доступны экспериментальному исследованию в настоящее время и какой прогресс можно здесь ожидать в не слишком отдаленном будущем — скажем, в ближайшие 10—20 лет. Такое рассмотрение совершенно необходимо для того, чтобы в дальнейшем можно было оставаться на почве реальных возможностей эксперимента. Далее с привлечением самых последних экспериментальных данных анализируется, какие изменения претерпевают пространственно-временные отношения (в частности, причинно-следственные связи) в доступной современному опыту области микроскопических масштабов Δx и Δt . При этом все выводы основаны лишь на непосредственных экспериментальных фактах, без использования каких-либо теоретических экстраполяций и предположений, не подтвержденных еще экспериментально.

Подобное рассмотрение представляется сейчас тем более важным, что в последние годы появились работы, где дана весьма односторонняя, тенденциозная трактовка микроскопических свойств пространства — времени, основанная во многих случаях не на эксперименте, а на весьма субъективном отборе определенных теоретических разработок и обобщений.

Искусственное (на основе каких-то односторонних соображений) приписывание явлениям природы предполагаемых свойств, которые в данный момент, может быть, и представляются тому или иному автору весьма вероятными, но не подтверждены еще экспериментом, едва ли можно признать в качестве прогрессивного подхода в научном исследовании; ничего, кроме тупиков и путаницы, такой субъективистский подход дать не может. Вместе с тем при условии всестороннего и объективного анализа существующей экспериментальной ситуации теоретические догадки и предположения, какими бы порой фантастическими и невероятны-

ми они ни казались, обладают огромной эвристической силой и во многом определяют развитие научного исследования.

Часть книги, посвященную обсуждению экспериментальной ситуации, завершает рассмотрение пространственно-временных симметрий и тесно связанных с ним законов сохранения, в частности, — вопроса о том, насколько универсальны эти законы (например, закон сохранения энергии).

В специальной главе разбираются попытки дальнейшего развития и обобщения известных пространственно-временных представлений: возможности сверхсветовых скоростей сигналов; нелокальные, нелинейные и т. п. теории, «космологический подход», при котором микрообъекты рассматриваются как результат гравитационного коллапса огромных макроскопических масс, геометродинамические попытки свести весь окружающий нас материальный мир к «пустому» пространству. Поскольку большая часть рассматриваемого в этой главе материала имеет гипотетический и во многом еще не завершенный характер, то и обсуждение его является весьма дискуссионным, особенно когда дело касается оценки значимости того или иного теоретического направления. Возможно, что некоторые подходы, представляющиеся в настоящее время интересными и перспективными, быстро отомрут, а на первый план выйдут исследования, которые кажутся сейчас малоинтересными.

Трудности, связанные с интерпретацией опытов по изучению внутренней структуры элементарных частиц, и некоторые результаты, полученные при попытках обобщения существующих теорий, заставляют поставить вопрос о признаках, отличающих пространственно-временную форму существования материи от других возможных форм ее существования. В несколько другом аспекте этот вопрос часто формулируют еще и так: можно ли быть уверенным в том, что на любом уровне организации материи всегда применимы описания физических явлений в терминах пространственно-временных понятий или же, хотя бы в принципе, можно допустить какие-то «внепространственные» и «вневременные» формы существования материи? Эти вопросы привлекают сейчас пристальное внимание физиков, и они нашли отражение в данной книге.

Следует сразу же отметить, что эта книга не является «материалом для легкого чтения», поскольку обсуждаемые в ней проблемы, будучи связаны с самыми глубокими разделами современной физики элементарных частиц, очень сложны сами по себе и понимание их даже при весьма популярном изложении требует значительного напряжения. Трудности усугубляются еще и тем, что популярных статей и книг по физике элементарных частиц в настоящее время крайне мало.

В наиболее трудных местах указаны ссылки на литературу, где можно найти более детальное изложение соответствующего вопроса.

В заключение я хотел бы поблагодарить члена-корреспондента АН СССР М. Э. Омельяновского, докторов философских наук Ю. В. Сачкова, И. А. Акчурина, Л. Б. Баженова, Ю. Б. Молчанова и других сотрудников Института философии АН СССР за многочисленные обсуждения, стимулировавшие написание данной книги. Я глубоко признателен также доктору философских наук А. М. Мостепаненко, а особенно — члену-корреспонденту АН СССР [Г. А. Свечникову] и профессору В. С. Готту, беседы с которыми прояснили многие оставшиеся неясными для меня вопросы.

В. С. Барашенков

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мостепаненко А. М., Мостепаненко М. В. Четырехмерность пространства и времени. М.—Л., «Наука», 1966.
2. Мостепаненко А. М. Проблема универсальности основных свойств пространства и времени. Л., «Наука», 1969.
3. Андреев Э. П. Пространство микромира. М., «Наука», 1969.
4. Блохинцев Д. И. Пространство и время в микромире. М., «Наука», 1970.
5. Лукьянец В. С. Физико-математические пространства и реальность. Киев, «Наукова думка», 1971.
6. Ахундов М. Д. Проблема прерывности и непрерывности пространства и времени. М., «Наука», 1974.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной чертой нашего времени является необычайно бурное развитие естествознания, особенно физики. Затраты на фундаментальные исследования в области атомного ядра, элементарных частиц и космофизики сейчас значительно превосходят то, что вкладывается в другие области человеческого знания. Это обусловлено, конечно, прежде всего тем, что физика более чем какой-либо другой раздел современной науки составляет основу арсенала техники и открывает пути к новым видам энергии, поиск которых всегда будет иметь первостепенное значение для человечества.

Однако не только важное прикладное значение физических исследований определяет их лидирующий характер. Здесь мы имеем дело с явлениями, происходящими в минимально и в максимально доступных нам пространственно-временных областях; вырабатываемые при этом образы и понятия выходят далеко за рамки конкретных физических процессов и существенно влияют на все мировоззрение.

Астрофизика и физика элементарных частиц являются теми науками, которые определяют границы наших представлений о свойствах пространства и времени «сверху», т. е. со стороны грандиозных метагалактических расстояний $\Delta x \approx 10^{28}$ см и времен $\Delta t \approx 10^{17}$ сек, и «снизу» — из области ультрамалых субатомных интервалов $\Delta x \approx 10^{-17}$ см, $\Delta t \approx 10^{-27}$ сек. Пространственно-временные масштабы изменяются при этом почти на 45 порядков. Фантастически различны и соответствующие материальные объекты: квазары и колоссальные звездные ассоциации, с одной стороны, нейтрино и чрезвычайно короткоживущие, почти эфемерные резоны — с другой.

Интерпретация результатов наблюдений, относящихся к таким «предельным» протяженностям и длительностям, по необходимости связана с глубоким анализом самых основных понятий и представлений, лежащих в фундаменте современной картины мира, в том числе с анализом смысла самого пространства — времени. Без такого анализа уже сейчас невозможно осмыслить, например, эффект «разбегания» галактик, происхождение теплового реликтового излучения во Вселенной, данные по электромагнитной струк-

туре нуклонов, нарушение пространственной и комбинированной четности в слабых взаимодействиях и т. п. Формальное применение известных нам «обычных» пространственно-временных представлений приводит в этих случаях к трудностям.

Глубокий мировоззренческий смысл результатов, получаемых в физике и других разделах естествознания, можно по-настоящему раскрыть и осознать только с помощью философии — науки, которая на высшем уровне суммирует и обобщает достижения различных отраслей знания. «<...> естествознание, — подчеркивал В. И. Ленин, — прогрессирует так быстро, переживает период такой глубокой революционной ломки во всех областях, что без философских выводов естествознанию не обойтись ни в коем случае» [1, с. 31].

Следует, однако, иметь в виду, что многие важные положения мировоззренческого характера (в частности, представления о строении микро- и мегамира) возникают внутри естествознания и формулируются, на первый взгляд, совершенно независимо от философии. Подобная независимость представляет собой, конечно, всего лишь иллюзию. Независимость, свобода от каких-либо философских взглядов, о которой иногда говорят некоторые естествоиспытатели, является лишь кажущейся. Хотя они этого или нет, но философские воззрения, присущие их времени, проявляются в выборе темы исследования, отражаются на его методе, существенно сказываются на выдвижении тех или иных гипотез и на интерпретации результатов исследования. Философия как мировоззрение и методология всегда была и останется важным средством влияния общества на ученых и их исследования.

Тем не менее, поскольку наиболее важные обобщения формулируют сейчас часто сами естествоиспытатели, а не профессионалы-философы, это иногда служит основанием для утверждений о том, что философия как самостоятельная наука вообще не существует и представляет собой, в сущности, лишь популярное разъяснение тех выводов общего характера, которые делают специалисты в «конкретных науках». Эту точку зрения очень четко сформулировал Рейхенбах: «Путь философа, — писал он в сборнике, посвященном Эйнштейну [2]. — указывается путем ученого. Все, что может сделать философ, — это проанализировать результаты науки, придать им смысл и выявить их правильность. Теория познания является анализом науки». Такой взгляд на философию далеко не нов и, в частности, усиленно пропагандировался Контом и его последователями еще в середине прошлого века.

В годы после второй мировой войны отрицательный взгляд на философию как самостоятельную науку был весьма распространен среди некоторых физиков, что в значительной степени явилось ответной реакцией на критику квантовой теории и теории относительности теми физиками и философами, которые не смогли воспринять идей этих важнейших разделов современной науки и пытались их ревизовать (а то и просто запретить) на основе хотя и

весьма наглядных, но совершенно не применимых здесь идей классической физики XIX в., заменяя недостающую физическую аргументацию произвольно толкуемыми общефилософскими концепциями. Подобные попытки подменить научное и, в первую очередь, экспериментальное исследование очень общими и слепо воспринимаемыми философскими положениями нанесли большой вред как философии, так и естествознанию; их последствия, проявляющиеся в скептическом отношении некоторых ученых к философии, чувствуются еще и сейчас.

Конечно, все философские концепции и принципы возникают в результате исследований, выполняемых в области «конкретных наук», однако, являясь обобщением результатов этих исследований, они содержат благодаря этому *нечто такое, что нельзя получить в рамках отдельных наук*. Другими словами, философия как наука может вырабатывать внутри себя положения и критерии, непосредственно не содержащиеся в данных других наук и имеющие несомненную эвристическую ценность. Характеризуя эту особенность философии, Рассел образно назвал философию «ничейной землей» между религиозными доктринаами и конкретными науками [3]. По мере развития последних философские положения становятся доступными все более детальной и всеобъемлющей проверке и постепенно «сдвигаются» в область еще большей общности (в отличие от религиозных доктринаов, которые по самой своей сути являются произвольным и излишним элементом, принципиально недоступным каком-либо экспериментальной проверке).

Хорошим примером того, как внутри философии вырабатываются новое знание, обладающее большой эвристической силой, может служить известное положение В. И. Ленина о неисчерпаемости электрона. Полученное не физиком, а философом, это положение уже в течение более чем полувека оказывает существенное воздействие на развитие физики [4]. Поэтому едва ли можно согласиться с высказываемым иногда мнением о том, что предметом философии должна быть только теория познания, решение же всех онтологических вопросов целиком принадлежит естествознанию.

Когда дело касается принципиальных, фундаментальных исследований, довольно бессмысленно говорить о естествознании (в частности, о физике) и о философии отдельно; на практике оба эти аспекта научного исследования переплетаются и образуют единый сплав, определяющий передовые рубежи нашего знания. Именно здесь происходит становление знания, и этот процесс не мыслим вне методологических и мировоззренческих проблем. Любой серьезный эксперимент, любое серьезное теоретическое исследование в настоящее время в конечном счете связаны с решением таких проблем.

Более того, понятия и образы современной физики стали настолько абстрактными и сложными, а эксперимент — таким дорогоим и трудновыполнимым, что решить, какая из двух альтерна-

тивных теорий более предпочтительна, часто оказывается возможным, лишь если на каком-то этапе исследования в качестве физических критериев использовать некоторые философские положения. Нередко используют, например, требование, чтобы все величины, входящие в теорию, были, хотя бы в принципе, измеримы (так называемый критерий наблюдаемости). На основе этого требования многие теоретики вслед за Гейзенбергом пытались всю квантовую физику сформулировать только лишь на языке энергетических уровней и амплитуд падающих и расходящихся волн. В основе интенсивно развивавшейся в последние годы геометродинамики также лежит философское положение о том, что пространство является более «глубокой» и первичной сущностью, чем время и даже вещества. Можно привести и другие аналогичные примеры (см. гл. 2—4).

Интересно, что во многих случаях ученый даже не замечает неявного использования тех или иных философских положений. Однако эта черта современного научного исследования становится все более и более важной. Подчас очень трудно установить, где философский, а где естественно-научный элемент исследования. Конечно, при этом следует быть достаточно осмотрительным, чтобы не сползти на натуралистические позиции, когда философские положения превращаются в догмы, диктующие, что должно и чего не должно быть в природе; высшим судьей в конечном счете является эксперимент. «Сами по себе философские положения не могут быть основой для конкретного предвидения результатов как экспериментальных исследований, так и математических вычислений. Философские положения могут участвовать в таком предвидении, лишь приобретая специфические для данной области исследования формы своего выражения и входя как сторона в какую-то естественно-научную теорию» [5]. Это, понятно, ни в коей мере не означает «растворения» философии в естествознании; философия как наука полностью сохраняет свои категории.

Можно указать три основные цели и задачи философии, касающиеся ее связи с естествознанием.

Первая из них — выработка мировоззрения, что особенно важно для выбора стержневого направления научного поиска. Не нужно пояснять, что успех исследования существеннейшим образом зависит от того, насколько точно и объективно отражает закономерности природы мировоззрение исследователя.

Многовековой опыт развития науки выработал мировоззрение диалектического материализма, в котором наиболее глубоко и адекватно отражены основные закономерности окружающего нас мира. Однако диалектический материализм нельзя рассматривать как полностью законченную, раз и навсегда созданную теорию. Как и любая другая научная теория, диалектический материализм неизбежно включает в себя определенный субъективный элемент, поэтому по мере развития наших знаний различные философские положения и взгляды приходят в противоречие с накоп-

ленным экспериментальным материалом и необходимо их дальнейшее уточнение и обобщение. Сохраняя неизменным свой основной принцип — принцип существования объективного мира независимо от нас и вне нас, диалектический материализм изменяет свою форму с каждым новым естественно-научным открытием.

Философия диалектического материализма представляет собой единство двух сторон: мировоззрения и метода; обе эти стороны пребывают в постоянном движении и по-разному конкретизируются на различных этапах развития естествознания. Поэтому вторая важнейшая задача философии заключается в разработке методологии естествознания, в установлении философских критериев научного исследования, предохраняющих его от тупиков и в то же время достаточно динамичных, чтобы не стать тормозом развития. В процессе своей эволюции философия диалектического материализма выработала ряд таких критериев: требование причинности, положение о неисчерпаемости природы и, в частности, следующий отсюда вывод об ограниченном характере любой естественно-научной теории, рассмотрение явлений происходящими не иначе как в пространстве и во времени (хотя формы пространственно-временных отношений могут быть существенно отличны от тех, что мы сейчас называем пространством и временем) и т. п.

Разумеется, нельзя утверждать, что эти критерии сформулированы предельно строго. Как и другие философские положения, они являются следствием опыта, а не априорны, и с течением времени видоизменяются и совершенствуются. Однако они настолько общи, что любая естественно-научная концепция прежде всего должна проверяться на выполнимость этих критериев. Вместе с тем анализ возможных обобщений философских критериев, представляющих собой квинтэссенцию наших знаний о природе, служит важным стимулом дальнейшего развития науки, особенно физики.

Третья важная задача философии заключается в глубоком критическом анализе основ различных областей естествознания. Каждый раздел науки, если он достаточно богат по своему содержанию, имеет в своей основе систему весьма общих положений, аксиом и принципов, которые нельзя обосновать, оставаясь в рамках только данного раздела науки. Анализ и обоснование этих аксиом и принципов в значительной степени — предмет философского рассмотрения, так как только философия, опираясь на огромный суммарный опыт многих смежных наук, может путем обобщения и экстраполяций выйти за рамки известных на данном этапе экспериментальных фактов.

Прогресс науки постоянно тормозится тираническим влиянием определенных идей и концепций, которые, будучи первоначально прогрессивными, с течением времени становятся «очевидными» и превращаются в догмы. Огромная заслуга марксистской философии состоит в том, что она постоянно стимулирует анализ и

критический пересмотр, казалось бы, самых очевидных и незыблемых положений.

Особенно существенна роль философии при анализе и разрешении кризисных и парадоксальных ситуаций в теории. Как известно, попытки преодоления внутренних логических трудностей теории остаются основным стимулом ее развития, пока накопленных экспериментальных данных недостаточно для пересмотра узловых положений этой теории; поэтому анализ внутренних противоречий на основе единого философского и естественно-научного подхода имеет первостепенное значение для дальнейшего логического совершенствования теории и подсказывает пути для ее возможных обобщений.

Не будет преувеличением сказать, что в философии, как в зеркале, находяг свое отражение основные трудности естествознания. Именно такая критическая, спорящая философия нужна современному естествознанию. «Признание каких-либо неизменных элементов, «неизменной сущности вещей» и т. п., — подчеркивал В. И. Ленин, — не есть материализм, а есть *метафизический*, т. е. антидиалектический материализм» [6, с. 275—276]. Это ленинское положение следует рассматривать как основополагающее при философском обсуждении проблем естествознания.

На многих примерах можно проследить, как во всех случаях, когда дело касается основ науки, абсолютизация каких-либо конкретных достижений естествознания или фетишизация определенных методологических положений, как правило, неминуемо приводит к возникновению различного рода натурфилософских построений. При этом за основу берутся не экспериментальные факты и их взаимосвязи, а общие принципы и определения, которые и имеют решающее значение, а фактам отводится только иллюстративная роль*.

Весьма характерной чертой натурфилософии является присущее ей стремление к установлению различных «всеобщих законов» природы без достаточных для этого физических оснований, а также глубокая убежденность в том, что имеющихся знаний вполне достаточно для построения «окончательной» картины мира.

Показательным примером натурфилософии может служить книга В. Н. Вейника [8], где наперекор огромному числу экспериментальных фактов в угоду своей философской концепции автор утверждает, что нейтрино представляет собой «самую большую мистификацию XX в.», придумывает массу несуществующих форм движения (вплоть до «нююхательной» и «осязательной»!) и т. д. Типичнейшим примером натурфилософии была критика кибернетики, квантовой химии и генетики в конце сороковых — начале пятидесятых годов.

* Интересное исследование причин возникновения и роли натурфилософии в физике дано в докторской диссертации А. Ф. Перетурина [7].

В наше время бурно развивающейся науки любая естественно-научная концепция очень быстро превращается в натурфилософскую, если исходные положения теории фетишизируются, а их экспериментальная проверка и уточнение подменяются некоторой системой априорных философских положений.

Вместе с тем было бы неправильным думать, что философские гипотезы вообще невозможны. Выше уже говорилось о том, что, являясь результатом обобщения огромного количества фактических данных многих наук, философия может вырабатывать новые понятия, однако, в противоположность натурфилософскому подходу, настоящая философия не претендует на предсказание или опровержение каких-либо *конкретных* данных естествознания; область ее применения относится к методологическим и мировоззренческим аспектам, которые, тем не менее, становятся далее весьма действенным и активным элементом естественно-научного исследования.

«<...> критерий практики, — отмечал В. И. Ленин, — никогда не может по самой сути дела подтвердить или опровергнуть *полностью* какого бы то ни было человеческого представления» [6, с. 145—146]. Осознание этого факта особенно важно, когда речь идет о фундаментальных понятиях и положениях, лежащих в основе отдельных разделов современного естествознания, для которых, как правило, присуща большая степень общности и абстрактность. Суммируя опыт, накопленный в различных областях науки, философия может выдвигать гипотезы, обобщающие и ревизующие эти понятия и положения. Основанные на анализе имеющихся данных, философские гипотезы могут предсказывать и даже формулировать новые мировоззренческие и методологические идеи в естествознании.

В качестве примера таких философских гипотез можно привести развивающиеся некоторыми авторами положения о возрастающей роли свойств дискретности и об увеличении информативной емкости пространственно-временных структур по мере перехода в область все меньших и меньших масштабов, гипотезу, отрицающую абсолютный характер такого, казалось бы, универсального закона природы, как закон сохранения энергии, и предсказывающую возможность обнаружения таких форм движения материи, к которым неприменимо само понятие энергии, и т. п. С этими и другими подобными гипотезами мы еще встретимся в следующих главах.

Важное методологическое значение философских гипотез заключается в том, что они выявляют ограниченность привычных нам идей и понятий. «Мысль человека, — писал В. И. Ленин, — бесконечно углубляется от явления к сущности, от сущности первого, так сказать, порядка к сущности второго порядка и т. д. *без конца*» [9, с. 227], и в этом нескончаемом процессе философия и естествознание неразрывно связаны друг с другом. В то же время В. И. Ленин едко высмеивал тех философов и естествоиспытателей, которые, не имея никаких фактических данных, выдвигали гипотезы, предсказывавшие будущее развитие науки.

телей, которые на основе весьма ограниченных и недостаточно проверенных и осмысленных экспериментальных фактов готовы, как говорится, с ходу отказаться, как от устаревших, от основных философских положений, представляющих собой обобщение огромного эмпирического материала. Философские положения нужно не только проверять, но отстаивать.

Основываясь на этих общих, но важных для последующего изложения замечаниях, перейдем теперь к анализу экспериментальных данных о свойствах микроскопического пространства и времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ленин В. И. О значении воинствующего материализма. — Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 45.
2. Reichenbach H. The philosophical significance of the theory of relativity. In: Albert Einstein, philosopher-scientist. New York, Inc., 1959, p. 274.
3. Рассел Б. История западной философии. М., Изд-во иностр. лит., 1959, с. 7.
4. Барашенков В. С., Блохинцев Д. И. Ленинская идея неисчерпаемости материи в современной физике. — В кн.: В. И. Ленин и современное естествознание. М., «Мысль», 1969.
5. Кедров Б. М. Философия как общая наука. — «Вопросы философии», 1962, т. 6, с. 55.
6. Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. — Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 18.
7. Перетурин А. Ф. Философские аспекты теоретического обоснования закона сохранения и превращения энергии. Дисс. на соиск. ученой степени докт. философских наук. М., 1968.
8. Вейник В. Н. Термодинамика. Минск, «Высшая школа», 1968.
9. Ленин В. И. Философские тетради. — Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 29.

Глава 1

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Когда мы говорим о пространстве и времени, в представлении возникает прежде всего образ привычного и кажущегося таким естественным макроскопического пространства — времени с характерными для него свойствами протяженности и длительности, связности, изотропии и однородности, континуальной непрерывности, трехмерности пространства и одномерности, односторонности времени. А поскольку в нашем распоряжении сейчас нет средств, которые позволили бы как-то воздействовать на эти свойства (максимум, что мы можем сделать, это — несколько изменить метрику пространства — времени), всегда есть соблазн абсолютизировать хотя бы некоторые из них, придав им характер всеобщих, необходимых признаков пространства и времени.

На протяжении многовековой истории развития философии и естествознания отчетливо проявляются две основные онтологические концепции пространства и времени. Первая восходит еще к Демокриту и получила свое законченное выражение в «Началах» Ньютона. Согласно ей, пространство и время по самой своей сущности безотносительны к чему бы то ни было внешнему, являются необходимым условием существования материи и остаются всегда одинаковыми, пространство — однородным и изотропным, а время — равномерно протекающим. Вторая концепция рассматривает пространство и время неразрывно связанными с материей, определяемыми ее движением и ее конкретными свойствами. Впервые такая точка зрения, отрицающая существование абсолютной пустоты и абсолютного, ни с чем не связанного времени, была четко выражена Аристотелем; в последующем она получила свою законченную формулировку в философии диалектического материализма и естественно-научное воплощение в теориях Лобачевского и Эйнштейна*.

Если структура и свойства пространственно-временных отношений, реализующих собой форму, способ бытия материи, определяются движением этой материи, зависят от его свойств и ха-

* С историей и эволюцией этих двух основных взглядов на сущность пространства и времени можно познакомиться, например, прочитав книгу А. М. Мостепаненко [1].

рактера, то следует ожидать, что по мере проникновения знания в область специфических субатомных явлений все более отчетливо должны проявляться какие-то новые качества пространства и времени, существенно отличающиеся от тех, с которыми мы привыкли иметь дело в обыденной практике. Какими будут эти новые качества? В частности, останутся ли пространство и время в микроскопических интервалах непрерывными или же проявятся свойства их дискретности, допустимы ли сверхсветовые скорости передачи взаимодействий, возможны ли такие нарушения пространственно-временных симметрий, при которых энергия и импульс станут несохраняющимися величинами, наконец — какой смысл имеет само пространство — время в области ультрамалых масштабов?

Возможность кардинального изменения привычных нам «макроскопических» пространственно-временных отношений при переходе к ультрамалым масштабам понимал уже Риман. В своей статье «О гипотезах, лежащих в основании геометрии» он писал: «<...> вопросы о метрических отношениях пространства в неизмеримо малом не принадлежат к числу праздных <...>. Эмпирические понятия, на которых основывается установление пространственных метрических отношений, — понятия твердого тела и светового луча, — по-видимому, теряют всякую определенность в бесконечно малом. Поэтому вполне мыслимо, что метрические отношения пространства в бесконечно малом не отвечают геометрическим допущениям» [2, с. 323]. Однако эти замечательные мысли еще долго оставались лишь гениальным предвидением. Только в XX в. развитие техники позволило реально приступить к экспериментальному исследованию таких расстояний и длительностей, где действительно могут происходить существенные изменения макроскопических свойств пространства и времени.

Обсуждению результатов этих исследований, критическому разбору некоторых недостаточно обоснованных выводов о свойствах микроскопического пространства и времени и посвящена настоящая глава. Два больших вопроса, имеющих важное самостоятельное значение, — проблема микропричинности и законы сохранения — выделены в отдельные главы.

§ 1. Физические пределы пространственно-временного описания

Сведения о микроскопических свойствах пространства и времени можно получить, изучая рассеяние частиц. Такие эксперименты полностью аналогичны нашему повседневному опыту, когда мы *видим* определенный предмет благодаря детектированию сетчаткой глаза пучков света, рассеянных этим предметом.

Чем более точную информацию о пространственно-временных деталях мы хотим получить, тем более быстрые частицы должны участвовать в эксперименте по рассеянию. Этот вывод является прямым следствием законов квантовой механики, согласно кото-

рым о траектории рассеивающейся частицы можно говорить только с точностью до длины дебройлевской волны ее относительного движения

$$\lambda = \hbar / p_{\text{отн}} = \hbar c / E_{\text{отн}} \approx \sqrt{2\hbar^2/EM}, \quad (1)$$

где $p_{\text{отн}}$ и $E_{\text{отн}}$ — импульс и кинетическая энергия относительного движения частицы; M — масса частицы-мишени в лабораторной системе координат; E — кинетическая энергия рассеивающейся частицы в этой системе координат; \hbar — постоянная Планка; c — скорость света. (Такие обозначения использованы во всей книге.) В этом легко убедиться, если вспомнить, что в квантовой механике параметр удара λ и орбитальный момент относительного движения частицы l связаны соотношением

$$x = \lambda \sqrt{l(l+1/2)} \approx \lambda l \quad (2)$$

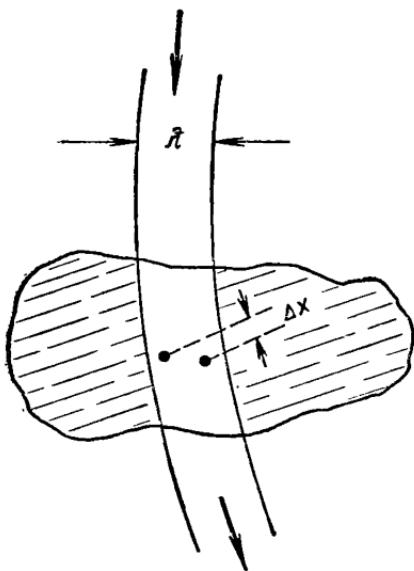
(подробнее об этом см., например, § 98 монографии А. С. Давыдова [3]), а поскольку орбитальный момент может принимать лишь целочисленные значения, то $\Delta l = 1, 2, 3, \dots$ и, следовательно, $\Delta x \geq \lambda \Delta l \approx \lambda l$. Отсюда также хорошо видно, что минимальный размер определяется длиной дебройлевской волны *относительного* движения, так как только для относительного движения, т. е. для системы центра масс, определяется орбитальный момент l . Об этом часто забывают, используют для оценки Δx лабораторную систему координат и получают существенно заниженные значения Δx (например, 9 Гэв значение Δx оказывается при этом заниженным более чем в три раза, а для ускорителя на 76 Гэв в Серпухове — почти на порядок).

Рис. 1. Траектория частицы размазана внутри трубы толщиной λ . Детали, разделенные пространственными интервалами $\Delta x < \lambda$, частица «не различает», воспринимая их как единий точечный объект

для ускорителя в Дубне при этом заниженным более чем в три раза, а для ускорителя на 76 Гэв в Серпухове — почти на порядок).

Образно говоря, траектория квантовой частицы «размазана» внутри трубы с диаметром $d \approx \lambda$ (рис. 1), поэтому, используя эту частицу в качестве «щупа», можно различить отдельные события лишь в том случае, если они разделены пространственными расстояниями $\Delta x > \lambda$ и временными интервалами $\Delta t > \lambda/c$.

Протоны, ускоренные синхрофазотроном ($E = 9$ Гэв) в Дубне, имеют длину волны $\lambda \approx 9 \cdot 10^{-15}$ см, поэтому, изучая столкновения



элементарных частиц, в Дубне можно экспериментально исследовать пространственно-временные интервалы, большие $9 \cdot 10^{-15}$ см и $3 \cdot 10^{-25}$ сек. Протонные ускорители в Женеве и в Брукхейвене (США) с энергией $E \approx 30$ Гэв и советский ускоритель в Серпухове ($E \approx 76$ Гэв) дают частицы с длиной волны соответственно 5×10^{-15} и $3 \cdot 10^{-15}$ см, т. е. $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-25}$ и 10^{-25} сек. Еще меньшую длину дебройлевской волны, $\lambda \approx 1,5 \cdot 10^{-15}$ см, имеют протоны в ускорителе, запущенном недавно в Батавии, вблизи Чикаго ($E \approx 400$ Гэв).

В принципе, на действующих ускорителях можно исследовать и меньшие пространственно-временные интервалы, если в качестве мишени использовать не нуклон, а более массивное атомное ядро. Из соотношения (1) видно, что минимальные значения Δx и Δt при этом уменьшаются в $1/k$ раз, где $k = \sqrt{1/A}$, A — массовое число ядра-мишени. Для углеродной мишени $k \approx 0,3$; для мишени из ядер урана $k \approx 0,07$. Однако при столкновении высокогенетической частицы с ядром, когда энергия налетающей частицы намного превышает энергию связи внутриядерных нуклонов (последняя не превосходит десятка мегаэлектронвольт), в подавляющем числе случаев происходит взаимодействие налетающей частицы только с одним из нуклонов ядра. Никакого уменьшения длины дебройлевской волны при этом, конечно, не происходит ($k=1$). Лишь относительно редко реализуются столкновения, в которых ядру передается небольшой импульс, недостаточный для его разрыва, и налетающая частица взаимодействует с ядром как с целым. Происходящие при этом процессы, упругое рассеяние и так называемое когерентное рождение частиц, несут информацию об очень малых пространственно-временных интервалах на периферии ядра. К сожалению, поскольку импульс налетающей частицы изменяется лишь незначительно и рассеяние происходит в очень узкий телесный угол, провзаимодействовавшие частицы очень трудно отделить от частиц первичного пучка; другие вторичные частицы, если они образуются, также концентрируются в области очень малых углов $\theta \lesssim \lambda/R$ (R — размер ядра мишени), где их детектирование опять-таки сопряжено с большими экспериментальными трудностями. Тем не менее изучение явлений, происходящих при взаимодействиях с небольшой передачей импульса, представляется настолько важным, что это направление в дальнейшем, по-видимому, будет одним из наиболее быстро развивающихся.

Обращает на себя внимание очень медленное уменьшение длины волны по мере роста энергии (а следовательно, и стоимости) ускорителя. Ускоритель на 400 Гэв, построенный в Батавии, представляет собой чрезвычайно сложное инженерное сооружение, в то же время длина волны λ по сравнению с длиной волны ускорителя в Серпухове (76 Гэв) уменьшилась всего лишь в два раза. Это говорит о том, что идеи, положенные в основу современных методов ускорения, в значительной степени исчерпали себя.

Увеличение магнитного поля, «сжимающего» орбиты ускоряемых протонов путем применения сверхпроводящих магнитов, позволит, по-видимому, построить ускоритель с энергией протонов в несколько тысяч гигаэлектронвольт. Однако реализация таких проектов даст возможность уменьшить длину дебройлевской волны всего лишь в 2—2,5 раза (т. е. до значений $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-16} \div 10^{-15}$ см). Дальнейшее продвижение в этом направлении едва ли возможно; во всяком случае, оно становится непомерно дорогим и чрезвычайно сложным в техническом отношении.

Перспективным подходом к изучению процессов при сверхвысоких энергиях является использование двух сталкивающихся пучков частиц. В этом случае лабораторная система координат фактически совпадает с системой центра масс и вся кинетическая энергия сталкивающихся частиц есть энергия их относительного движения, поэтому ускоритель, в котором осуществляется столкновение двух встречных пучков частиц с энергией E , эквивалентен «обычному ускорителю» с покоящейся мишенью и пучком ускоренных частиц, кинетическая энергия которых равна $2E^2/M$ (M — масса частицы; эта формула следует из релятивистского преобразования энергии из системы центра масс в лабораторную систему координат). Такие системы успешно действуют в Новосибирске и в нескольких зарубежных лабораториях. В 1971 г. в Женеве введена в действие система двух сталкивающихся пучков протонов с энергией 30 Гэв. Источником протонов в ней служит ранее построенный циклический ускоритель, специальная магнитная система позволяет удерживать на круговых орбитах (в двух так называемых накопительных кольцах) большое число ускоренных протонов с последующей их встречной разрядкой. Такая система эквивалентна «обычному ускорителю» с энергией частиц около 1800 Гэв — наибольшей энергией, полученной до настоящего времени в лаборатории, — и позволяет исследовать пространственно-временные масштабы $\Delta x \approx 7 \cdot 10^{-16}$ см и $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-26}$ сек. Создание в будущем аналогичной системы на базе серпуховского ускорителя позволило бы получить энергию частиц около 10^4 Гэв и длину волн $\lambda \approx 3 \cdot 10^{-16}$ см. Однако это — весьма сложная задача, решение ее весьма дорогостоящее.

Нуж совсем трудным, хотя и не безнадежным, кажется создание сталкивающихся пучков частиц с энергией 10^3 Гэв. В этом случае можно было бы исследовать явления при энергиях около 10^6 Гэв, что соответствует масштабам $\Delta x \approx 2 \cdot 10^{-17}$ см и $\Delta t \approx 10^{-27}$ сек, а если в качестве мишени использовать тяжелые ядра, то экспериментально достижимые значения Δx и Δt уменьшатся еще более чем на порядок.

Большие надежды в последние годы связывались с созданием высокоэнергетических ускорителей на основе так называемого метода коллективного ускорения. Как показали исследования, выполненные в Дубне, с помощью специальным образом подобранных электромагнитных полей можно создать устойчивую систему,

состоящую из сгустка положительно заряженных частиц в центре и внешнего, охватывающего их кольца из большого числа электронов. Под действием продольного, перпендикулярного его плоскости электрического поля кольцо будет ускоряться, увлекая за собой положительно заряженные частицы, а поскольку заряд кольца достаточно велик, можно ожидать, что ускорение, приобретаемое при этом отдельными частицами, намного превзойдет ускорение частиц в обычных ускорителях. Первоначальные оптимистические оценки показывали, что таким методом можно ускорять протоны до энергии приблизительно 1 Гэв на расстоянии всего лишь около 1 м. К сожалению, сейчас появились серьезные сомнения в этом, указывающие, что метод коллективного ускорения эффективен, по-видимому, только для ускорения тяжелых ионов и в области не очень высоких энергий.

Таким образом, можно ожидать, что в ближайшие 10—20 лет с помощью ускорителей будут достигнуты значения $\Delta x \approx 10^{-16} - 10^{-17}$ см, $\Delta t \approx 10^{-26} - 10^{-27}$ сек, а далее, в не слишком отдаленной перспективе возможно исследование по крайней мере раз в десять меньших областей пространства и времени, что на три—пять порядков меньше геометрических размеров нуклона и π -мезона.

Изучение микроскопических свойств пространства и времени путем непосредственного вмешательства в явления, протекающие в субатомных интервалах Δx и Δt , представляет собой наиболее прямой и информативный путь исследования. Вместе с тем возможен и другой подход, когда сведения о свойствах микроскопических пространственно-временных объектов получают, анализируя влияние процессов, локализованных в ультрамальных интервалах Δx и Δt , на явления, протекающие в значительно больших областях пространства и времени, которые уже можно исследовать с помощью имеющихся в распоряжении экспериментатора длин волн. Хорошим примером такого подхода может служить, в частности, определение зарядового радиуса нейтрона $\langle r \rangle$ в опытах с рассеянием тепловых нейтронов на атомах. Если радиус $\langle r \rangle$ заметно отличен от нуля, то в распределении рассеянных нейтронов должны проявиться отклонения от изотропии, и хотя длина де-бройлевской волны рассеивающихся нейтронов в этих опытах во много тысяч раз превосходит размеры нейтрона, чрезвычайно высокая точность эксперимента позволила установить, что $\langle r \rangle$ не превышает 10^{-14} см. Другим аналогичным примером является предпринятая недавно в Станфорде проверка справедливости законов квантовой электродинамики вплоть до расстояний $\Delta x \sim 10^{-14}$ см в опытах с рассеянием электронов, длина волны которых $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-14}$ см. В этом случае результат удалось получить из-за высокой точности измерений возможных отклонений от теоретической кривой, полученной на основе квантовой электродинамики.

Повышение точности эксперимента можно достичь прежде всего значительным увеличением интенсивности пучков частиц в ускорителях. Следует ожидать, что в ближайшее десятилетие эта

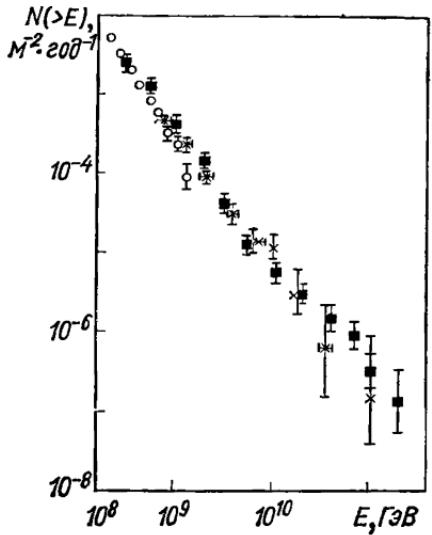


Рис. 2. Число космических частиц с энергией большей E , приходящееся на 1 m^2 земной поверхности за год; точки — экспериментальные данные различных групп

интенсивность возрастет на несколько порядков, это также даст возможность по крайней мере в несколько раз понизить границу доступных нам интервалов Δx и Δt .

Кроме ускорителей имеется еще один важный источник частиц высоких и сверхвысоких энергий — космическое излучение. Опыты с ним долгое время оставались уникальным способом изучения свойств высокоэнергетических взаимодействий. Однако по мере того,

как один за другим начинали работать ускорители, позволившие в хорошо контролируемых условиях получить интенсивные пучки частиц все более и более высоких энергий, интерес к исследованиям с помощью космического излучения постепенно снижался. Это обусловлено прежде всего тем, что в опытах с космическим излучением очень трудно получить надежные количественные результаты. Число космических частиц быстро уменьшается с ростом их энергии (рис. 2), поэтому для достаточно точных измерений требуются длительные экспозиции и громоздкие детектирующие устройства (например, частицы широкого атмосферного ливня, инициированного высокоэнергетической космической частицей, распределяются часто на площади в несколько квадратных километров). Статистика регистрируемых взаимодействий в опытах с космическим излучением очень мала, характеристики высокоэнергетических взаимодействий измеряются весьма неточно, поэтому выводы имеют лишь ориентировочное грубокачественное значение. Тем не менее уникальная возможность экспериментировать с частицами сверхвысоких энергий (десятки и сотни тысяч гигаэлектронвольт) является мощным стимулом в развитии этого направления. Таким путем можно исследовать явления при энергиях вплоть до 10^{11} — 10^{12} Гэв и выше, т. е. изучать пространственно-временные масштабы $\Delta x \geq 10^{-20} \text{ см}$, $\Delta t \geq 10^{-30} \text{ сек}$ *.

* Наибольшая зарегистрированная в настоящее время энергия космических частиц составляет несколько единиц 10^{12} Гэв [4]. К. Грейзен, Г. Т. Зацепин и В. А. Кузьмин привели ряд соображений в пользу того, что на рубеже энергии 10^{10} — 10^{11} Гэв спектр космических частиц должен резко обрываться. Однако на опыте ничего подобного не наблюдается. С чем это связано — остается неясным. Для объяснения высокоэнергетического хвоста в спектре космического излучения предложено несколько интересных гипотез, но экспериментальных данных пока еще недостаточно, чтобы выбрать одну из них [5].

Видно, что экспериментальные возможности исследования микроскопических свойств пространства и времени уже в недалеком будущем могут значительно превзойти то, что доступно нам в настоящее время, однако эти возможности, по-видимому, еще долго останутся ограниченными масштабами порядка $\Delta x \sim 10^{-18} \div 10^{-20}$ см и $\Delta t \sim 10^{-28} \div 10^{-30}$ сек*. Что касается меньших интервалов, то их присутствие в физических теориях имеет смысл лишь далеко идущей экстраполяции. О числе и свойствах различных пространственно-временных структур, отделяющих нас от «нуля», мы, говоря словами Локка, имеем представление не в большей мере, чем моряк о глубине моря там, где, опустив значительную часть своего лота, он недостигает дна; поэтому он знает, что глубина больше стольких-то саженей, но о том, как велико это «больше», он не имеет никакого понятия [6, с. 231].

Как правило, физические теории формулируются таким образом, чтобы вклад от ультрамалых областей Δx и Δt оставался пренебрежимо малым. (В частности, именно этой цели служит перенормировка в квантовой теории поля и «процедура вычитаний» при выводе дисперсионных соотношений; см. гл. 2.) Вместе с тем в принципе возможна и такая постановка вопроса, когда о свойствах пространства и времени в недоступных пока еще непосредственному экспериментальному исследованию интервалах судят на основе определенных теоретических построений, исходя из свойств других, зависящих от них и измеримых физических величин.

В известном смысле такая «обратная задача» решается при рассмотрении максимонов, испаряющихся «черных дыр» и других гравитационных объектов, связанных с исключительно малыми пространственно-временными масштабами (см. гл. 4).

Для удобства дальнейшего обсуждения разделим область доступных нам в эксперименте микроскопических интервалов на четыре части, характеризующиеся определенными различиями в свойствах пространственно-временных отношений: область молекулярно-атомных явлений, интервал, где главную роль играют релятивистские квантово-электродинамические процессы, область элементарных частиц и, наконец, область ультрамалых масштабов $\Delta x \leq 10^{-16}$ см и $\Delta t \leq 10^{-28}$ сек, доступных пока только в опытах с космическим излучением. Понятно, что границы между этими областями определяются весьма приближенно, лишь по порядку величины, в соответствии с постепенным нарастанием одних и подавлением и исчезновением других свойств исследуемых явлений.

* Конечно, все эти оценки основаны на предположении, что квантово-механические соотношения (1) и (2) остаются приблизительно такими же и в очень малых пространственно-временных интервалах. Некоторая неопределенность, связанная с возможностью неожиданных открытий, вообще характерна для любых прогнозов.

§ 2. Область молекулярно-атомных явлений

Характерной чертой пространственно-временных отношений в области макроскопических явлений является непрерывная зависимость пространственных координат физической системы от времени: $x=x(t)$. Координаты и соответствующие им импульсы $p(t)=-mdx/dt$ оказываются при этом неразрывно связанными, и описание поведения макроскопической системы возможно лишь при совместном рассмотрении координат и импульсов. Другими словами, макроскопическое описание является *единым* координатно-импульсным описанием.

Существенно, что импульсы выступают здесь как величины, характеризующие изменение *пространственной* структуры макросистемы; по самому своему определению они соотнесены с пространством — временем и вне его не имеют смысла.

При переходе к молекулярно-атомным микропроцессам, реализующимся в пространственно-временных областях $\Delta x \sim 10^{-6} \div 10^{-11}$ см и $\Delta t \sim 10^{-17} \div 10^{-22}$ сек, непрерывная зависимость пространственной координаты x и импульса частицы p от времени теряет смысл и функциональная связь между этими величинами оказывается разорванной; для описания микросистемы становится возможным использовать либо пространственные, либо только импульсные координаты. Описание становится вероятностным, а непрерывная зависимость от времени переносится на волновую функцию и на квантовые операторы.

В отличие от области макроскопических явлений каждого из описаний, пространственного и импульсного, в отдельности вполне достаточно для определения как состояния микросистемы, так и его изменения с течением времени. В этом смысле можно говорить о независимости и эквивалентности координатных и импульсных переменных, и в этом заключается существеннейшее изменение наших пространственно-временных представлений при переходе к области молекулярно-атомных микропроцессов.

Вместе с тем в применении к ансамблю микросистем эти два описания дополняют друг друга, так как характеризуют различные аспекты реального поведения физической микросистемы. Так, распределение электронов в атоме, характеризуемое в импульсном представлении форм-фактором $\mathcal{F}(q)$, где q — передаваемый импульс, дополняется картиной их пространственного распределения

$$p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{F}(q) \exp(iqx) d^3q. \quad (3)$$

Поэтому противопоставление пространственного и импульсного описаний весьма условно и относительно. Это особенно отчетливо видно, когда дело касается поведения микросистемы в среднем: описание в этом случае снова становится единым координатно-импульсным (теорема Эренфеста).

Импульсные переменные квантовой механики, несмотря на их кажущуюся формальную независимость от пространственной картины явления, по-прежнему характеризуют движение системы в пространстве и времени. На любом этапе исследования с помощью преобразования, подобного переходу от $\mathcal{F}(q)$ к $\rho(x)$ в формуле (3), можно перейти от импульсного аспекта рассматриваемого явления к пространственному, и обратно; никаких запретов для таких переходов аппарат квантовой механики не содержит.

В физической, а особенно в философской литературе, можно часто встретить утверждения о неприменимости пространственно-временного описания к квантовым явлениям. Как правило, в это утверждение вкладывают лишь тот смысл, что в современной квантовой механике движение частицы нельзя наглядно описать как движение по траектории $x=x(t)$, при этом существование самих пространства и времени сомнению не подвергается (см., например, работы [7–10]). Термин *пространственно-временное описание* в этом случае эквивалентен использованному выше термину *координатно-импульсное описание*. Вместе с тем некоторые авторы, указывая на невозможность пространственно-временного описания квантовых объектов, понимают это как необходимость вообще отказаться от пространства и времени в микромире. Так, И. С. Алексеев считает, что пространство — это всего лишь особая форма существования макроматерии, не имеющая места в микромире, где пространственно-временные понятия представляют собой всего лишь характеристики макроскопических событий обнаружения микрообъектов, а «тенденция считать их характеристиками микрообъектов «как таковых», т. е., в конечном счете, характеристиками микропространства <...> представляет собой остатки непреодоленной инерции мышления» [11, с. 230]. По мнению И. С. Алексеева, отказ от пространственных различий микрочастиц позволит более естественно объяснить факт отсутствия траектории у микрочастиц: раз нет пространства, то о траектории не может быть и речи. Пространственные характеристики, фигурирующие в математическом аппарате квантовой механики, опишут тогда только места обнаружения микрочастиц в микропространстве, но не способ существования микрочастиц, который будет задаваться не пространственно, а при помощи их свойств [12, с. 164].

Эти заключения основаны главным образом на том факте, что для коллектива тождественных частиц нельзя указать, что именно данная частица N находится в точке x , так как волновая функция системы симметризована (антисимметризована) по всем частицам и с равным правом можно считать, что в точке x находится любая другая частица коллектива. Отсюда делается вывод о том, что микрочастице вообще нельзя сопоставить никакой пространственной точки и, следовательно, понятие пространства становится совершенно ненужным, излишним *элементом теории*, подобно, на-

пример, понятию эфира в электродинамике. Это весьма остроумная точка зрения, однако с ней нельзя согласиться. Во-первых, свойство неразличимости положений частиц относится только к тождественным частицам, для частиц различной природы (и для отдельной частицы) имеют место обычные пространственно-временные соотношения; во-вторых, свойство неразличимости положений вовсе еще не делает излишней пространственную картину явлений и объектов. Например, многоэлектронный атом и молекулу можно не только характеризовать уровнями энергии, но также построить для них (а главное — определить в эксперименте) пространственную картину распределения плотности электрического заряда, которая является далеко не лишней характеристикой хотя бы уже потому, что позволяет рассчитывать такую практическую важную величину, как электрическая поляризуемость. Измерения радиусов нуклонов, пространственных распределений их электрического заряда и магнитного момента также едва ли можно считать излишними и только лишь макроскопическими характеристиками измерений. В этом случае весьма трудно объяснить, например, тот факт, что предсказываемая на основе пространственной картины структуры нуклона его деформация в электромагнитных полях действительно проявляется в эксперименте (подробнее см. об этом в обзорах [13, 14]). То обстоятельство, что процессы взаимодействия в квантовой механике можно описывать на языке импульсно-энергетических переменных, и то, что в опытах с микрообъектами мы также имеем дело прежде всего с этими переменными, совсем не означает, что пространственное описание потеряло свое значение и стало излишним*.

Нельзя согласиться также с довольно распространенными в литературе утверждениями о том, что «к изменениям типа квантового скачка временные понятия неприменимы», что «изменение, осуществляющееся при помощи квантового скачка, не обладает длительностью» (см., например, статью [15, с. 264, 265]). Встав на эту точку зрения, мы будем вынуждены допустить, что в релятивистской инвариантной теории, которую (во всяком случае формально) можно записать в пространственно-временных координатах, возможны невременные перемещения электрона в атоме на расстояния $\Delta x \sim 10^{-8}$ см. Подобные удивительные выводы являются следствием представления о том, что «несколько различных состояний одного и того же объекта могут существовать сразу, а не по одному» [15, с. 264]. При этом опять-таки забывают о том, что квантовая механика — статистическая теория и гово-

* Для микроскопических явлений И. С. Алексеев предлагает заменить категории пространства и времени категорией структуры. Однако, как отмечено в редакционном примечании к статье И. С. Алексеева [12, с. 167], при этом автор не принял во внимание, что категория структуры точно так же имеет «макроскопическое» происхождение, как и критикуемые им «макроскопические категории» пространства — времени, и в применении к объектам микромира встречает большие трудности (см. § 4).

рить о сосуществовании различных состояний можно лишь по отношению к коллективу объектов, а не для одного, например, атома или молекулы. Когда речь идет о квантовом переходе между состояниями E_1 и E_2 , эти состояния измеряются для *различных* частиц, а время измерения $\Delta t > \hbar / |E_2 - E_1|$, поэтому в рамках современной квантовой теории вопрос о точном значении времени квантового скачка для какого-либо фиксированного объекта не имеет смысла. (Эти вопросы подробно разобраны, например, в книге Д. И. Блохинцева [16].)

Иногда подчеркивается, что важнейшей чертой пространственно-временных отношений в квантовой области является возможность движений «без прохождения промежуточных точек», когда движущаяся частица «исчезает в одной точке и появляется в другой, не смежной с первой». Так, в книге А. Н. Вяльцева [17] в качестве примера микросистемы с подобной «дискретностью движения» указан гармонический осциллятор, волновая функция которого обращается в нуль в некоторых промежуточных пространственных точках, что означает равную нулю вероятность обнаружения осциллятора в этих точках. По мнению А. Н. Вяльцева, «рассмотренный пример имеет в квантовой механике общее значение, соответственно с чем общее значение имеет и взгляд на движение микротел как на движение без прохождения промежуточных точек» [17, с. 54].

Однако все подобные утверждения основаны на использовании макроскопических пространственно-временных представлений в квантовой области, где положение частицы *статистически* описывается сразу всей волновой функцией $\psi(x)$ и говорить о прохождении некоторой последовательности пространственных точек можно лишь для волнового пакета, который, как это нетрудно показать (см., например, книгу Бома [18, с. 359—361]), движется по классической траектории, проходя через *все* промежуточные точки.

Вопреки утверждениям, содержащимся в монографии А. Н. Вяльцева, в настоящее время нет совершенно никаких экспериментальных указаний на то, что в области молекулярно-атомных процессов проявляется (или намечается) дискретность каких-либо свойств пространства и времени.

Неоправданы встречающиеся иногда в литературе утверждения о «больших изменениях», которые претерпевают в микромире «фундаментальные макроскопические понятия» — точки, линии, расстояния, углы [10]. выводы о том, что пределы применимости метрических пространственно-временных соотношений типа длины ($\Delta x, \Delta t$) обнаруживаются уже при атомных расстояниях порядка 10^{-8} см [19, с. 299]. Тот факт, что в области квантовых явлений нельзя осуществить процесс бесконечного уменьшения интервалов Δx и Δt , вовсе не мешает нам ввести понятие точки, так как все пространственно-временные длины, меньшие минимальных доступных в эксперименте интервалов $\Delta x_{\min} \approx \lambda$ и $\Delta t_{\min} \approx \lambda/c$, будут про-

являться как точки. И совершенно так же, как в классической механике, можно, в принципе, с помощью теоретической экстраполяции перейти к абстракции геометрической точки и момента времени.

Когда говорят, что в микромире нельзя осуществить процесс бесконечного уменьшения, поскольку с бесконечным уменьшением частицы у нее до бесконечности возрастает масса [10], выражаются весьма неточно. Для измерения очень малых интервалов Δx и Δt не требуется какого-либо «уменьшения частицы» (да это и невозможно!), измерять расстояния и другие детали пространственно-временной структуры можно и с протяженными частицами, изучая их рассеяние (см. § 4).

Нельзя согласиться с утверждениями о том, что в физике нет методов измерения расстояния внутри атома, «нет физического процесса, который бы реализовал в микромире геометрическую линию» [10, с. 52, 53]. С точностью до $\Delta x \sim \hbar \rightarrow 0$ такая линия реализуется любой быстрой частицей, а хорошо разработанные методы рентгеновской и электронной микрофотографии позволяют получить достаточно отчетливые «отпечатки» не только молекул, но и атомов.

Как будет показано в следующих разделах, с помощью аналогичных методов можно исследовать пространственные детали и значительно более мелких объектов — нуклонов и мезонов.

В пределах точности современных экспериментов никаких нарушений известных нам метрических соотношений в области молекулярно-атомных процессов не обнаружено; наоборот, все выводы квантовой механики, которая существеннейшим образом основана на евклидовых (или псевдоевклидовых при больших скоростях) метрических и топологических аксиомах, находятся в замечательном согласии с опытом.

Однако достаточно ли полна пространственно-временная картина микроявлений, которую дает современная квантовая механика? Следует сразу же подчеркнуть, что эта проблема имеет два существенно различных аспекта. Во-первых, насколько всеобъемлющим и точным является квантовомеханическое описание? (Другими словами, нельзя ли указать какие-либо экспериментальные факты, которые не описываются квантовой механикой в ее современной формулировке?) Во-вторых, возможны ли, в принципе, такие постановки вопроса, касающиеся пространственно-временных свойств микроявлений, которые не противоречат основным положениям современной квантовой механики, но на которые она, тем не менее, не может дать ответа?

Что касается первого аспекта, то во всяком случае в области молекулярно-атомных явлений в настоящее время неизвестно каких-либо экспериментальных данных, которые бы противоречили предсказаниям квантовой механики; в пределах погрешностей измерений теория и эксперимент всегда оказываются в прекрасном согласии. Вместе с тем это вовсе не означает, что в будущем, при

переходе к более глубоким пространственно-временным структурам, не могут быть обнаружены явления, количественно или даже качественно не согласующиеся с известными сейчас квантово-механическими законами. Более того, принцип неисчерпаемости свойств материи убеждает в неизбежности обнаружения таких расхождений. В этом смысле заключение о принципиальной неполноте и ограниченности квантовой механики представляется почти тривиальным.

Значительно менее ясен второй аспект проблемы, поскольку современная квантовая механика (по крайней мере, в принципе) способна предсказать результат *любого* мыслимого эксперимента с микрообъектами. Однако очень важно отдавать себе отчет в том, что независимо от ее интерпретации — использовать ли для этого концепцию ансамблей или же рассматривать волновую функцию как характеристику потенциальных возможностей проявления индивидуальной микрочастицы при измерениях* — современная квантовая теория является существенно статистической теорией и ее вывод о несовместимости одновременного координатного и импульсного описаний имеет вероятностный характер в том смысле, что с каждым отдельным микрообъектом каждый раз выполняется только одно измерение. Это измерение, если допустить возможность определения точного значения координаты или импульса, настолько сильно искажает состояние микрообъекта, что измерение дополнительной величины — импульса или координаты — можно выполнить уже лишь с другим микрообъектом. Что касается отдельного микрообъекта, то предположение о существовании у него в какой-то точке x определенного значения импульса p само по себе, вообще говоря, не противоречит ни эксперименту, ни аппарату современной квантовой теории — такая постановка вопроса просто выходит за рамки этой теории и относится уже к ее интерпретации. Гейзенберг, один из создателей современной квантовой теории, например, давно подчеркивал, что эта теория «все-таки не дает никакого описания того, что происходит на самом деле, независимо от наблюдений или между нашими наблюдениями. Что-нибудь должно, ведь, однако, происходить, в этом мы можем не сомневаться. Это «что-нибудь» нельзя, возможно, описать с помощью понятий электрона или волны, или светового кванта, но

* Как известно, в настоящее время существуют два основных подхода к интерпретации статистической природы волновой функции. В первом из них, который, по нашему мнению, более последователен, волновая функция рассматривается как характеристика ансамбля микрочастиц, принципиально не применимая для описания индивидуальной микрочастицы. Во втором подходе, наоборот, считается, что Ψ -функция характеризует результаты взаимодействия с макроприбором отдельного микрообъекта, находящегося в заданных макроскопических условиях. Однако в обоих случаях волновая функция имеет статистическую природу и относится к ансамблю событий. (Подробнее см. об этом в монографии Д. И. Блохинцева [16].)

поскольку оно не описывается каким-либо образом, задача физики еще не выполнена» [8, с. 116] *.

По мнению некоторых авторов тот факт, что квантовая теория в соответствии с экспериментом показывает отсутствие у микрочастиц каких-либо вполне определенных траекторий $x(t)$, вовсе не исключает движения этих частиц по каким-то скрытым от нашего непосредственного наблюдения траекториям. Часть этих авторов (Д. Бом, Я. П. Терлецкий и др.) пытаются найти выход путем возврата к строго детерминированным закономерностям. Квантовая механика в их представлении в сущности является лишь некоторым размытым, туманным изображением истинной картины явлений. Такой подход трудно согласовать с возрастанием роли вероятностного элемента, которое отчетливо проявляется при переходе к ультрамалым пространственно-временным интервалам. Следует думать, что это направление обречено на неудачу (см. подробнее § 9, 11).

Другие физики (см., в частности, работы А. А. Тяпкина [9, 20, 21]) видят выход не в отказе от статистических закономерностей, а в построении более общей теории, которая, например, на основе анализа функций распределения для различных измеряемых в опыте величин, даст описание вероятности движения *каждой индивидуальной* микрочастицы вдоль некоторой случайной, но каждый раз вполне определенной траектории **.

Часто можно слышать, что подобным надеждам не суждено оправдаться, поскольку в соответствии с известной теоремой фон Неймана (см. [22, с. 158, 241]) в аппарат современной квантовой механики невозможно ввести какие-либо скрытые параметры, с помощью которых можно было бы как-то идентифицировать и различать между собой случайные траектории. Однако доказательство фон Неймана основано на положениях современной квантовой теории, в то время как скрытые параметры, если они действительно существуют, лежат вне этой теории [9, 16].

Наряду с этим существует и другая точка зрения. Значительная часть физиков (если не большинство) считает, что специфика квантовых явлений такова, что понятие траектории индивидуальной микрочастицы вообще не имеет смысла: его просто нельзя определить. «Неверно думать, — пишет Д. И. Блохинцев [23,

* Следует заметить, что это часто цитируемое высказывание в действительности отражает точку зрения не самого Гейзенберга, а взгляды Эйнштейна, которые Гейзенберг разбирает в работе [8]. Я благодарен А. А. Тяпкину, обратившему мое внимание на это обстоятельство.

** Тот факт, что какое-либо явление или свойство непосредственно не наблюдаemo, вовсе не означает его непознаваемости и не может служить достаточным основанием для отрицания его существования. В физике много величин, которые определяются лишь косвенным образом — на основе измерений других величин. Весьма поучителен в этом отношении также пример с измерением траектории маятника в фазовом пространстве, приведенный в работе [9].

с. 489], — что современный физический эксперимент недостаточно точен для измерения одновременных значений импульса и координат микрочастиц. Напротив, точность физического эксперимента достаточно высока для доказательства того, что для микрочастиц одновременно эта пара величин не существует в природе».

Какая из двух альтернативных точек зрения на полноту современной квантовой теории справедлива, покажут лишь дальнейшие исследования. Существенно, что в настоящее время это — всего лишь точки зрения, а не строго доказанные выводы*.

Важным этапом развития квантовой теории явился фейнмановский подход, в котором амплитуда перехода квантовой частицы из точки x_1 в точку x_2 является суммой (континуальным интегралом) вкладов всех возможных пространственно-временных траекторий, соединяющих точки x_1 и x_2 [24]. При некоторых условиях фазовые множители, определяющие относительные веса отдельных траекторий, могут почти полностью компенсировать друг друга и некомпенсированным остается вклад всего лишь одной траектории; этот частный случай и соответствует обычному классическому движению частицы.

При таком подходе устраняется интуитивная пропасть между классической и квантовой картинами движения, хотя в принципиальной точки зрения квантовая механика в формулировке Фейнмана является, конечно, «самой обычной» и в этом смысле ничем не отличается от квантовой механики, изложенной, например, в учебниках [3, 23]. На каждом этапе вычислений можно стандартным методом перейти от фейнмановской формулировки к обычным выражениям, содержащим волновую функцию.

Иногда говорят, что Фейнман показал полную применимость понятия траектории в квантовой механике и тем самым ограничил область действия соотношения неопределенностей $\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$. Следует подчеркнуть, что подобные высказывания принципиально неверны: никаких дополнительных ограничений на область действия соотношения неопределенностей формулировка Фейнмана не вносит. Довольно безразлично, утверждаем ли мы, что траектория частицы в квантовой механике в общем случае не имеет смысла (поскольку благодаря статистическому описанию движения частицы ей присущее распределение импульса в интервале $\Delta p \sim \hbar/\Delta x$) или же говорим, что частица не имеет определенного значения импульса, так как статистические волновые законы не позволяют локализовать ее траекторию с точностью, лучшеей $\Delta x \sim \hbar/\Delta p$. В обоих случаях речь идет о том, что движение частицы в *современной* квантовой теории нельзя одновременно характеризовать точными значениями ее координаты и импульса. Кроме того, следует иметь в виду, что амплитуда вероятности каждой отдельной траектории в континуальной сумме Фейнмана является комплексной величи-

* Я благодарен А. А. Тяпкину за обсуждение вопросов, касающихся полноты квантовой теории.

ной, поэтому говорить о движении вдоль отдельных траекторий можно лишь в весьма условном, формальном смысле.

Подводя итог, можно сказать, что при переходе в область молекулярно-атомных масштабов сами пространство и время полностью сохраняют привычный для нас смысл. Тем не менее многие важные пространственно-временные отношения оказываются существенно иными, чем в классической физике макромира.

§ 3. Область квантово-электродинамических процессов

На расстояниях $\Delta x \leq 10^{-11}$ см, где в соответствии с соотношением В. Гейзенberга $\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$ неопределенность в значении энергии частицы, $\Delta E \approx c \Delta p \sim \hbar c / \Delta x$, порядка массы электрона, становится возможным образование виртуальных электронно-позитронных пар. Движение частиц и их взаимодействие обусловлены здесь законами квантовой электродинамики, которые остаются определяющими вплоть до расстояний $\Delta x \sim 10^{-13}$ см, когда уже существенно оказывается новый тип взаимодействий — так называемые сильные (или ядерные) взаимодействия.

На расстояниях $\Delta x \sim 10^{-11}$ см впервые начинают проявляться детали внутреннего строения элементарных частиц. Правда, пока это только внешняя часть их электромагнитной структуры, обусловленная «облаками» виртуальных электронно-позитронных пар, плотность которых $\rho(x)$ еще невелика и содержит лишь незначительную часть электрического заряда частиц [форм-фактор $\mathcal{F}(q)$ в формуле (3) мало отличается от единицы], поэтому влияние электронно-позитронных облаков оказывается лишь как небольшая добавка к основным электромагнитным эффектам*. Однако при определенных условиях (например, при рассеянии частиц на очень малые углы, когда их взаимодействие происходит с большими параметрами удара, в основном как раз на расстояниях

* В философской и популярной физической литературе часто утверждается, что электромагнитный размер электрона определяется его так называемым классическим радиусом $r_0 = \hbar/m_e c^2 \approx 2,8 \cdot 10^{-18}$ см (m_e — масса электрона). Именно таким окажется радиус электрона в классической электронной теории, если потребовать, чтобы вся масса электрона была чисто электромагнитного происхождения. Однако в квантовой электродинамике, где выражение для собственной энергии электрона зависит от его радиуса значительно слабее (всего лишь логарифмически), это требование приводит к очень малому значению радиуса $r_{ke} \sim 10^{-70}$ см. «Классический радиус» r_0 в действительности не имеет никакого отношения к реальному электромагнитному размеру электрона, который определяется размером облака виртуальных электронно-позитронных пар и по порядку величины равен комптоновой длине волны пары

$$\chi \approx \hbar c / \Delta p \approx \hbar / 2m_e c \sim 10^{-11}$$
 см.

Как и у других элементарных частиц, плотность вещества электрона на расстояниях порядка 10^{-11} см чрезвычайно мала, и ее измерение выходит далеко за рамки современных экспериментальных возможностей. В настоящее время электрон можно считать практически точечной частицей (см. также § 4).

$\Delta x \sim 10^{-11}$ см) «электронно-позитронная структура» элементарных частиц проявляется в эксперименте весьма заметно (подробнее об этом см. в работах [13, 14]).

Область квантово-электромагнитных явлений хорошо изучена. Достигнутые здесь точности измерений рекордны для современной физики. Например, для сверхтонкого расщепления основного уровня атома водорода с помощью водородного мазера получено фантастически точное значение с двенадцатью знаками:

$$v_H^{\text{эксп}} = 1420405751,7667 \pm 0,0010 \text{ Гц.}$$

Относительная погрешность составляет всего лишь $7 \cdot 10^{-12}\%$ [25].

К сожалению, точность соответствующего теоретического значения $v_H^{\text{теор}}$ пока еще намного меньше экспериментальной [26, 27] и, несмотря на колоссальную точность $v_H^{\text{эксп}}$, наилучшую проверку законов квантовой электродинамики в настоящее время дает сравнение экспериментального и расчетного значений аномального магнитного момента электрона*:

$$\Delta \mu_e^{\text{эксп}} = (1,159577 \pm 0,000035) 10^{-3};$$

$$\Delta \mu_e^{\text{теор}} = (1,159554 \pm 0,000527) 10^{-3}.$$

Эти значения совпадают с погрешностью $(0,02 \pm 0,05)\%$ [26, 28].

Прекрасное согласие расчетных и экспериментальных значений электродинамических величин имеет место и во всех других случаях. Так, для расщепления уровней в атоме мюония ($\mu^+ + e^-$)

$$v_\mu^{\text{эксп}} = 4463,3013 \pm 0,0040 \text{ Гц};$$

$$v_\mu^{\text{теор}} = 4463,323 \pm 0,019 \text{ Гц} [27, 29];$$

для расщепления нижних уровней в атоме водорода (лэмбовский сдвиг)

$$v^{\text{эксп}} = 1057,90 \pm 0,06 \text{ Гц};$$

$$v^{\text{теор}} = 1057,912 \pm 0,011 \text{ Гц} [30]$$

и т. д. Никаких расхождений между теорией и экспериментом сейчас не известно.

Следует особо остановиться на проверке инвариантности законов квантовой электродинамики по отношению к преобразованиям пространственного, временного и зарядового отражений P , T и C . В последние годы этот вопрос привлекал пристальное внимание физиков в связи с обнаруженным несохранением четности при слабых взаимодействиях элементарных частиц (см. также § 4).

* В единицах магнетона Бора $e\hbar/2m_e c$ магнитный момент электрона $\mu_e = -(1 + \Delta \mu_e)$.

Из повседневной практики хорошо известно, что законы, управляющие физическими процессами, совершенно не зависят от того, какая система отсчета, правая или левая, положена в основу. Каждому явлению соответствует зеркально отраженное, которое происходит точно по тем же законам, что и исходное явление. Однако для слабых взаимодействий левая и правая системы координат оказываются не эквивалентными, а прямой и зеркальный процессы различны. Более того, иногда зеркально отраженных объектов вообще не существует в природе. Например, не существует зеркального отражения для нейтрино и антинейтрино; другими словами, в природе нет частиц с такими направлениями спинов, которые получаются в этом случае при зеркальном отражении*. Тождественными с точки зрения физических законов оказываются процессы, которые отличаются друг от друга не только зеркальным отражением, но и одновременной заменой частиц античастицами. Физические законы остаются инвариантными только по отношению к такому комбинированному преобразованию, представляющему собой произведение пространственного и зарядового отражений.

Около двадцати лет назад Паули и Людерс показали, что если физическая система является релятивистской инвариантной, а все взаимодействия в ней локальными (т. е. каждый раз происходят в точке и не имеют пространственно-временной «размазки»), то все процессы в этой системе должны оставаться инвариантными также по отношению к произведению преобразований C , P и T . Эта так называемая CPT -теорема представляет собой один из самых строгих и общих результатов современной теоретической физики. В соответствии с теоремой обнаружение неинвариантности физических процессов при CP -преобразовании означало бы также, что эти процессы неинвариантны и по отношению к изменению знака времени. В этом случае нельзя было бы однозначно определить направление времени и понятия «раньше», «позже» потеряли бы свой инвариантный смысл.

После того как нарушение CP -инвариантности было обнаружено в распадах K -мезонов, ряд физиков — в том числе Ли, который вместе с Янгом впервые объяснил явление несохранения пространственной четности в слабых взаимодействиях, — выдвинули гипотезу о том, что инвариантность по отношению к пространственному и зарядовому отражениям нарушается не только в слабых, но и в электромагнитных взаимодействиях [31]. Однако

* Это можно пояснить следующими простыми соображениями. Образно говоря, нейтрино представляет собой левый винт с лептонным числом $L=+1$, антинейтрино — правый винт с $L=-1$. В зеркальной системе координат левый винт становится правым, и наоборот, значения же лептонных чисел не изменяются. Частицы, которые соответствовали бы таким комбинациям, в природе не существует. Если сделать дополнительное зарядовое отражение $L \rightarrow -L$, то в результате суммарного CP -преобразования нейтрино превращается в антинейтрино, и наоборот.

детальные экспериментальные исследования не подтвердили этой гипотезы. Например, из опытов следовало, что электрический дипольный момент нейтрона $d < 1.5 \cdot 10^{-24}$ е см [32, 33], тогда как в соответствии с гипотезой Ли и др. можно было ожидать, что $d \sim (10^{-19} \div 10^{-20}) e$ см. Экспериментальная вероятность распада $\eta \rightarrow \pi^0 + e^+ + e^-$ оказалась по крайней мере в несколько сот раз меньше теоретической, а различие дифференциальных сечений прямой и обратной реакций $n + p \rightleftharpoons d + \gamma$ в пределах экспериментальных погрешностей составляет менее нескольких процентов по сравнению с 20—40%, предсказываемыми теорией [34—36]*.

Проверка инвариантности электромагнитных процессов по отношению к отражению времени в опытах с мёссбауэровским поглощением с погрешностью до долей процента также не показала наличия каких-либо аномалий [38]. Не обнаружено никаких эффектов, связанных с нарушением временной четности, и в других экспериментах. Это однозначно говорит о том, что во всей доступной нам сейчас области пространства — времени законы квантовой электродинамики с высокой степенью точности остаются инвариантными при C -, P - и T -преобразованиях.

Наиболее убедительным доказательством инвариантности квантовой электродинамики по отношению к суммарному СРТ-преобразованию является совпадение с погрешностью $10^{-4}\%$ аномальных магнитных моментов электрона и позитрона и очень малое различие масс K^0_1 - и K^0_2 -мезонов ($\Delta m/m_k \sim 10^{-12}\%$).

Новое (по сравнению с рассмотренными выше молекулярно-атомными масштабами) в пространственно-временных отношениях в области квантовой электродинамики состоит в том, что для легких частиц здесь становятся существенными релятивистские эффекты. Структура пространства и времени соответствует в этом случае законам специальной теории относительности; при этом некоторые важные квантовые величины уже не имеют того физического смысла, который они имели в нерелятивистской области.

Так, собственное значение оператора производной координаты по времени dx/dt , который в нерелятивистской теории имеет физический смысл оператора скорости частицы v , для дираковского электрона оказывается равным скорости света c . И дело здесь, конечно, не в том, что «истинная» скорость электрона в областях $\Delta x \leq 10^{-11}$ см равна скорости света (см. монографию А. Н. Вяльцева [17, § 2.1]), а в том, что операторы, соответствующие определенным физическим величинам, в релятивистской теории вовсе не обязаны иметь тот же вид, что и в нерелятивистской квантовой механике; необходимо лишь выполнение принципа соответствия: при энергиях, значительно меньших энергии покоя частицы, $E \ll mc^2$, выражение для релятивистского оператора скорости

* Подробнее см. об этом в обзоре [37].

должно переходить в выражение для нерелятивистского оператора*.

Можно найти оператор, который будет удовлетворять всем необходимым требованиям и иметь собственное значение, в точности равное физической скорости релятивистской частицы $v=pc^2/E$ (p — импульс, E — энергия частицы). Соответствующим образом видоизменится и оператор координаты частицы **. Однако собственная функция определенного таким образом оператора координаты свободной (невзаимодействующей) частицы уже не является точечной δ -функцией, а оказывается «размазанной» по пространственно-временной области Δx порядка длины комптоновской волны частицы $\lambda_0=\hbar/mc$. (Напомним, что для электрона $\lambda_0=3,9 \cdot 10^{-11}$ см, для π -мезона $\lambda_0=1,4 \cdot 10^{-13}$ см, для нуклона $\lambda_0=2,1 \cdot 10^{-14}$ см.)

Такую размазку (так называемое релятивистское дрожание) обычно рассматривают как неизбежное следствие релятивистских квантовых законов движения. Не будем углубляться в обсуждение относящихся к этой проблеме весьма сложных вопросов (эти вопросы интенсивно обсуждаются, например, в работе [40], где приведена подробная библиография), укажем лишь, что и в релятивистской теории можно построить волновые функции (пакеты), реализующие локализацию свободной частицы (или поля, представляющего эту частицу) в сколь угодно малой области простран-

* Если, следуя монографии [17], собственное значение оператора dx/dt , который в квантовой механике по определению равен коммутационной скобке $(-i\hbar)^{-1}[x, H]$ (H — гамильтониан системы), действительно рассматривать как истинную скорость релятивистской микрочастицы $v_{ист}$, усреднение которой дает «наблюдаемую скорость» $v_{наб} < c$, то для π -мезонов и других заряженных бесспиновых частиц в любой системе координат $v_{наб}=0$ (!). Это является следствием того обстоятельства, что для всех заряженных бесспиновых частиц коммутатор $[x, H]$, а следовательно, и скорость $v_{ист}$ тождественно обращаются в нуль (см., например, [3, с. 232]).

Для релятивистской спинорной частицы различные пространственные компоненты оператора $dx/dt=(-i\hbar)^{-1}[x, H]$ не коммутируют между собой ($[x_h, H]=ca_h$, $[a_h, a_n]=2i\delta_{hn}$), поэтому собственное значение вектора скорости вообще нельзя определить. Если не учитывать этого обстоятельства, то можно получить парадоксальный результат, приведенный в монографии А. Н. Вяльцева [17, с. 23]:

$$v=[(\dot{x})^2+(\dot{y})^2+(\dot{z})^2]^{1/2}=\sqrt{3}c>c(!).$$

** Нужными свойствами обладает, в частности, так называемая положительно-частотная часть оператора dx/dt

$$(dx/dt)^+=(c^2p/E)\Lambda, \quad (4)$$

где $\Lambda=(\alpha p+\beta mc^2)/E$ — «знаковый оператор» с собственным значением, равным единице; α, β — известные матрицы Дирака. В качестве нового оператора релятивистской координаты частицы можно также выбрать положительно-частотную часть $x^+=(x-\Lambda x\Lambda)/2$, при этом сохраняется обычное квантово-механическое выражение для производной по времени: $(dx/dt)^+=(-i\hbar)^{-1}[x^+, H]$ (см., например, [3, с. 257, 258] и обзор [39]).

ства, хотя и не совпадающие с б-функцией. Примером может служить, в частности, выражение

$$\psi(x) = a^{-1/2} \exp [-(x - x_0)^2/2a^2], \quad (5)$$

описывающее сколь угодно точную локализацию положения частицы вблизи точки $x=x_0$, когда ширина пакета $a \rightarrow 0$. (Можно показать, что неопределенность импульса Δp остается при этом равной \hbar/a и при $a \rightarrow 0$ обращается в бесконечность в соответствии с соотношением неопределенности.)

Если учесть зависимость от времени, то локализованные подобным образом состояния с течением времени размываются. Однако для интервалов $\Delta t \ll a^2/c\lambda$ (λ — длина дебройлевской волны частицы) они сохраняют вид движущихся локализованных пакетов. Когда энергия частицы достаточно велика (т. е. λ очень мала), локализованные состояния оказываются весьма устойчивыми. Размазка пространственного положения частицы возникает в этом случае лишь при учете ее взаимодействий с другими полями, благодаря образованию облака виртуальных частиц. Но это уже — эффект внутренней структуры частицы и не касается положения ее центра масс. (Подробнее с этими вопросами можно познакомиться в работах [39, 41, 42].)

Таким образом, для пространственно-временных отношений в области $\Delta x \sim 10^{-11} \div 10^{-13}$ см, где определяющую роль играют квантово-электродинамические процессы, в основном характерные те же черты, что и для области больших масштабов; нет никаких экспериментальных указаний на нарушение известных соотношений между левым и правым, прошлым и будущим, на существование какой-либо дискретности в свойствах пространства — времени или на возможность каких-нибудь других столь же радикальных изменений наших пространственно-временных представлений, о чем иногда упоминается в литературе. В частности, сейчас нет совершенно никаких оснований говорить о каком-либо подтверждении так называемого свойства изотахии (т. е. существования некой универсальной скорости, с которой происходят все микродвижения), на чем упорно настаивает автор монографии [17].

Иногда подчеркивают, что в квантовой электродинамике мы впервые встречаемся с существенно новым свойством, когда движение частицы происходит не путем привычного нам геометрического перемещения, а посредством поглощения (т. е. полного исчезновения частицы как таковой) в одной пространственной точке x и рождения ее вновь в другой точке x'^* . Однако подобная картина является всего лишь формальным способом описания процесса движения на языке операторов рождения и поглощения и сама по себе еще не означает более глубокого раскрытия сущно-

* В монографии А. Н. Вяльцева [17] возможность движения частиц без прохождения ими промежуточных точек обсуждается уже в рамках нерелятивистской квантовой теории (см. с. 27).

сти механического движения. В частности, если операторы поглощения и рождения ввести для макроскопических частиц (а формально это можно сделать, поскольку аппарат квантовой теории поля в качестве предельного включает и случай тел большой массы), то движение таких макроскопических объектов будет также выглядеть как последовательность их поглощений и рождений в соответствующих пространственных объемах с тем лишь различием, что соотношение неопределенностей допустит тогда значительно более точную локализацию двух последовательных точек траектории x и x' .

Принципиально новый элемент пространственно-временных представлений, с которым мы действительно встречаемся в квантовой электродинамике, заключается в совершенно ином понимании природы пустоты — вакуума. В обычном представлении пустота отождествляется с областью пространства, где нет абсолютно никаких материальных объектов и которая не имеет никаких физических свойств, кроме чисто геометрических. Все ранее известные нам теории — классическая механика Ньютона, электродинамика Максвелла, теория гравитации Эйнштейна и даже нерелятивистская квантовая теория — допускали существование подобных сколь угодно больших областей, где пространство и время существуют сами по себе, без какой-либо связи с материй.

В квантовой электродинамике было впервые показано, что абсолютная пустота представляет собой всего лишь идеализацию: реальная физическая пустота, или, как принято теперь говорить, физический вакуум, является невообразимо сложной суперпозицией виртуально рождающихся и поглощающихся фотонов, электронно-позитронных пар и более тяжелых частиц (при $\Delta x < 10^{-13}$, см. § 4). В соответствии с квантовым соотношением неопределенностей каждая такая «вакуумная флуктуация» существует в течение времени $\Delta t \sim \hbar / \Delta m c^2$, которое тем меньше, чем больше масса этой флуктуации Δm . Вакуумные флуктуации проявляются во многих наблюдаемых на опыте физических явлениях; в частности, именно этими флуктуациями обусловлен лэмбовский сдвиг уровней в атоме водорода, поправки к магнитному моменту электрона и другие эффекты. Флуктуации характерны для любых, даже очень малых интервалов времени Δt , поэтому как нет пустого пространства, так нет и «абсолютно пустых» отрезков времени, в течение которых в данной области пространства ничего бы не происходило.

В современной физике вакуум рассматривают как особый вид материи — как поле в состоянии с минимально возможной энергией. Квантовая электродинамика впервые наглядно показала, что пространство и время нельзя оторвать от материи, что так называемая «пустота» — это также одно из состояний материи, сколь же неисчерпаемое богатством свойств, сколь и любое другое.

§ 4. Субатомные пространственно-временные отношения

Совершенно новый класс явлений мы встречаем на расстояниях, меньших 10^{-12} — 10^{-13} см. Для этих масштабов характерны сложные взаимопревращения сильно взаимодействующих элементарных частиц и значительное влияние эффектов их внутренней структуры. При этом ряд понятий и образов, играющих важную роль в области макроскопических явлений, существенно изменяются, а некоторые из этих понятий становятся вообще неприменимыми.

Прежде всего это относится к привычному для нас определению части как объекта, меньшего по величине и более простого по составу, чем исходное целое. В области субатомных масштабов такое определение оказывается совершенно несостоятельным. Например, протон на время $\Delta t \sim 10^{-25}$ сек может диссоциировать на протон и π^0 -мезон, который, в свою очередь, распадается на пару протон + антипротон: $p \rightarrow p + \pi^0 \rightarrow 2p + \bar{p}$. При этом протоны-компоненты по своим свойствам ничем не отличаются от исходного протона: эти частицы одинаково участвуют в ядерных реакциях. Смысл понятия «состоять» в подобных случаях становится весьма условным и в сущности выражает лишь тот факт, что исходная частица может виртуально диссоциировать на определенную совокупность вторичных частиц*.

Соответствующую трансформацию претерпевает и понятие элементарного. Благодаря процессам виртуальной диссоциации все наблюдаемые в эксперименте частицы, которые мы сейчас относим к разряду «элементарных», имеют сложную внутреннюю структуру и в то же время из них нельзя выделить «более элементарных» частей, поскольку при всех взаимодействиях эти частицы лишь переходят друг в друга. Именно этот признак в настоящее время и считают основным для решения вопроса, является данная частица элементарной или нет. По определению к группе «элементарных» сейчас относят все частицы, любые возможные распады которых — как реальные, так и виртуальные — происходят с дефектом масс, сравнимым с массами распадных «частиц-компонент» [43].

С этой точки зрения π -мезон, который распадается на пару $p + \bar{p}$, является элементарной частицей в отличие, например, от дейтона, который будет распадаться на протон и нейтрон с дефек-

* Вообще говоря, то обстоятельство, что части может оказаться не менее сложной, чем целое, встречается уже в квантово-электродинамических явлениях, где возможна, например, виртуальная диссоциация фотона на пару электрон + позитрон: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$ или процесс $e^- \rightarrow e^- + e^- + e^+$. Однако, как уже отмечалось в предыдущем параграфе, плотность облаков виртуальных частиц, возникающих в результате электромагнитных взаимодействий, очень мала, поэтому нарушение привычных соотношений целого и части здесь еще не проявляется так заметно, как на расстояниях $\Delta x \leq 10^{-13}$ см.

том масс, составляющим всего лишь примерно 0,2% массы нуклона*.

В ряде философских работ подчеркивается, что размер $\Delta x \sim 10^{-13}$ см имеет свойства элементарной длины, так как «по крайней мере в нашей части Вселенной нет физических объектов или процессов, которые могли бы реализовать пространственную протяженность, меньшую чем 10^{-13} см, и временной интервал, меньший чем 10^{-25} сек» [47, с. 184] **. Аналогичное утверждение содержится и в работе [49, с. 21]: «Мы можем представить себе расстояние, меньшее 10^{-13} см, и время, меньшее 10^{-24} сек, но этим масштабам не будут соответствовать физически отличающиеся одна от другой области или временные интервалы».

Однако с этими утверждениями (число их можно умножить) нельзя согласиться по следующим причинам. Во-первых, на электрон-позитронное облако в электроне приходится лишь ничтожная часть его полного заряда, во всех современных экспериментах по исследованию структуры элементарных частиц (в том числе и в известных опытах Хофтадтера по рассеянию электронов на протонах, где впервые были определены размеры протона) электрон проявляется как точечная частица. То же можно сказать о других лептонных частицах (не говоря уж о фотоне). Размеры этих частиц скажутся, лишь когда удастся намного повысить точность измерений или перейти к области длин $\Delta x \leq 10^{-16}$ см.

* Однако число объектов, которые мы считаем в соответствии с указанным определением «элементарными», очень велико: сейчас мы относим к ним много десятков различных частиц. Этот список можно сократить, если объединить частицы в семейства — мультиплеты и супермультиплеты — и члены каждого из этих семейств рассматривать как различные состояния одной и той же частицы. Например, восьмерка мезонов π^+ , π^- , ρ^0 , η , K^+ , K^0 , K^- , \bar{K}^0 считаются различными состояниями частицы «октета П». Есть мультиплеты с 35, 56 и большим числом состояний. Тем не менее и после этого число объектов, которые мы вынуждены считать элементарными, все еще очень велико.

Дальнейшего сокращения списка элементарных частиц можно достичь ценой предположения, что все сильно взаимодействующие частицы «построены» всего лишь из двух гипотетических частиц с дробными значениями электрического заряда и барионного числа — кварка и антикварка, каждый из которых имеет несколько независимых состояний. Благодаря дробности их квантовых чисел из кварков и антикварков можно составить все другие частицы, сами же кварки из частиц с целочисленными квантовыми числами построить нельзя — в этом смысле кварки более элементарны, чем все остальные частицы. Считается, что масса кварка, по-видимому, не меньше десяти масс нуклонов, поэтому при образовании, например, мезона из кварка и антикварка дефект масс оказывается во много раз больше массы результирующей частицы; проблема соотношения целого и части при этом становится еще более острой. Все попытки обнаружить кварки в свободном состоянии пока не привели к успеху. Более детально с этими вопросами в их философском аспекте можно познакомиться, прочитав статьи [14, 43, 44]; физическая сторона дела отражена, например, в монографиях [45, гл. VIII; 46].

** В более поздней книге [48] эти значения уменьшены ровно на порядок, однако и эти масштабы, как будет показано ниже, не могут претендовать пока на роль элементарных. Кроме того, остается непонятным сам принцип, на основании которого выбраны именно эти масштабы; с таким же правом можно было бы указать и любое меньшее значение Δx .

$\pm 10^{-17}$ см (см. § 5). Во-вторых, даже с помощью протяженных частиц (например, в опытах с нуклон-нуклонным рассеянием) возможно измерение пространственных расстояний, намного меньших 10^{-13} см (и соответственно интервалов $\Delta t \ll 10^{-25}$ сек). Таким способом в настоящее время исследуют пространственные детали структуры нуклонов, в несколько десятков раз меньшие, чем их радиусы (см. ниже).

Поэтому нельзя согласиться и с утверждением А. Н. Вяльцева о том, что «человеческие возможности в области пространственно-временных измерений ограничены величинами порядка 10^{-13} см в отношении расстояний и порядка 10^{-23} сек в отношении длительностей», так как «(...) из-за неизбежных индивидуальных ошибок измерения мы не можем проникнуть как раз в ту область, которая принадлежит самим частицам» [17, с. 69, 72]. В пределах обсуждавшихся в § 1 чисто аппаратурных ограничений все утверждения о принципиальной «эмпирической недоступности малых областей пространства — времени» лишены оснований*.

В монографии [72, с. 136] говорится о том, что «по отношению к ядерному полю пространство ядра является замкнутым», поскольку ядерные силы имеют малый радиус действия и в отличие, например, от электромагнитного поля не распространяются за пределы $\Delta x \sim 10^{-13}$ см; наоборот, по отношению к электромагнитному и гравитационному взаимодействиям пространство рассматривают как «открытое». Однако для замкнутости пространства существует вполне определенное физико-математическое понятие, не имеющее ничего общего с тем, что наблюдается на расстояниях порядка 10^{-13} см (и вообще при любых, достигнутых в настоящее время, интервалах Δx). С таким же правом можно было бы говорить о «замкнутости» пространства по отношению к любому явлению, локализованному в конечной пространственной области.

Подводя итог сказанному, следует заключить, что значение $\Delta x \sim 10^{-13}$ см — всего лишь приближенная граница ядерной структуры элементарных частиц. Подобно комптоновской длине волны электрона $h/mc \sim 10^{-11}$ см, этот размер характеризует переход к области новых явлений, однако, как и комптоновская длина, он не имеет свойств «элементарной» длины и не определяет никаких «атомов пространства и времени».

Под элементарной длиной l_0 физики понимают постоянную, играющую такую же фундаментальную роль, как, например, заряд электрона, скорость света или постоянная Планка \hbar . Другими сло-

* Недоумение вызывает содержащееся в монографии [17, с. 74—76] утверждение о том, что энергия рождающихся γ -квантов во всех случаях по порядку величины не превосходит 1 Гэв, на основании чего делается вывод о существовании «потолка частоты» и соответственно атома времени «хронона». В действительности никаких подобных ограничений ни экспериментальных, ни теоретических, не существует. Современные ускорители позволяют генерировать интенсивные пучки γ -квантов с энергией, на много порядков превышающей «потолок», указанный в монографии [17].

вами, элементарная длина l_0 должна быть *универсальным критическим размером*, существенно сказывающимся на свойствах всех явлений при $\Delta x \leq l_0$; в частности, постоянная l_0 должна самым существенным образом входить во все теоретически рассчитываемые величины при $\Delta x \leq l_0$. Очевидно, что ни одну из известных сейчас констант, имеющих порядок 10^{-13} см, нельзя рассматривать в качестве такой универсальной постоянной.

Вместе с тем современное состояние теории поля и физики элементарных частиц таково, что мы встречаемся с весьма серьезными трудностями при попытке пространственно-временного осмысливания ряда физических образов, которые возникают в результате анализа экспериментов в субатомных интервалах, меньших 10^{-13} см и 10^{-23} сек. Это происходит во всех случаях, когда необходимо учитывать эффекты «размазки» частицы, обусловленные образованием вокруг нее облака сильно взаимодействующих виртуальных частиц. Дело в том, что в эксперименте измеряют не само описывающее пространственную структуру распределение плотности $\rho(x)$, а только лишь значения форм-фактора $\mathcal{F}(q)$, которые нужны для вычисления плотности $\rho(x)$. В нерелятивистской области для этого используют формулу (3), а при анализе явлений в субатомных интервалах Δx и Δt , когда энергия взаимодействующих частиц очень велика, $\rho(x)$ вычисляют с помощью соотношения

$$\rho(x) \equiv \rho(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{F}(q) \exp(iqx) d^4x, \quad (6)$$

которое является релятивистско-инвариантным обобщением формулы (3) и переходит в нее, когда $cq_4 = E_{\text{кон}} - E_{\text{нач}} \rightarrow 0$.

Нетрудно видеть, что определенное таким образом значение $\rho(x)$ в общем случае зависит не только от пространственной, но и от временной координаты, т. е. мы получаем образ частицы, протяженной не только в пространстве, но и во времени — четырехмерную частицу.

Более того, в то время как плотность распределения массы заряда, магнитного момента или любой другой величины ξ , характеризующей физическую систему, выражается в квантовой теории как среднее соответствующего оператора для заданного состояния этой системы:

$$\rho_\xi(x) \equiv \langle \xi(x) \rangle = \psi^*(x) \hat{\xi}(x) \psi(x) \quad (7)$$

(здесь и далее значком « $\hat{}$ » отмечены операторы) и содержит волновые функции ψ^* и ψ , относящиеся к одному и тому же состоянию, величина ρ , определяемая соотношением (6), зависит от произведения различных волновых функций $\psi_{\text{кон}}^*(x)$ и $\psi_{\text{нач}}(x)$, описывающих состояния изучаемой частицы-мишени *до* и *после*

взаимодействия, так как именно эти функции входят в матричный элемент рассеяния M и содержатся в форм-факторе

$$F(q) \sim M \equiv \langle \psi_{\text{кон}}(x) | \hat{M} | \psi_{\text{нач}}(x) \rangle. \quad (8)$$

При взаимодействиях частиц, сопровождающихся небольшой передачей импульса, т. е. при далеких периферических столкновениях и в области нерелятивистских энергий, волновые функции $\psi_{\text{кон}}$ и $\psi_{\text{нач}}$ мало различаются (рис. 3) и величина (6) практически не отличается от квантово-механического среднего (7); формулы (3) и (6) в этом случае фактически совпадают. Наоборот, при взаимодействиях с большой передачей импульса, когда энергия отдачи сравнима с массой покоя исследуемой частицы-мишени или больше ее, лоренцевы сжатые волновые функции этой частицы до и после взаимодействия оказываются совершенно различными. Форм-фактор $\mathcal{F}(q)$ и соответствующая «плотность» $\rho(x)$ включают сложную интерференцию начального и конечного состояний, и хотя они характеризуют пространственно-временную структуру, однако создают образ пространственно-протяженной частицы весьма далекий от привычного нам.

Будучи единственным возможным, образ четырехмерно-протяженной частицы означал бы, конечно, существенное изменение наших пространственно-временных представлений, однако из приведенных рассуждений видно, что трудности физической интерпретации экспериментальных форм-факторов не принципиальны и, возможно, обусловлены не столько физикой, сколько недостаточно корректным определением пространственной плотности. Простое определение этой плотности как фурье-образа экспериментального форм-фактора $\mathcal{F}(q)$ применимо лишь при нерелятивистских энергиях; в более общем случае следует вернуться к исходному определению плотности как квантово-механического среднего в определенном физическом состоянии. Экспериментальные форм-

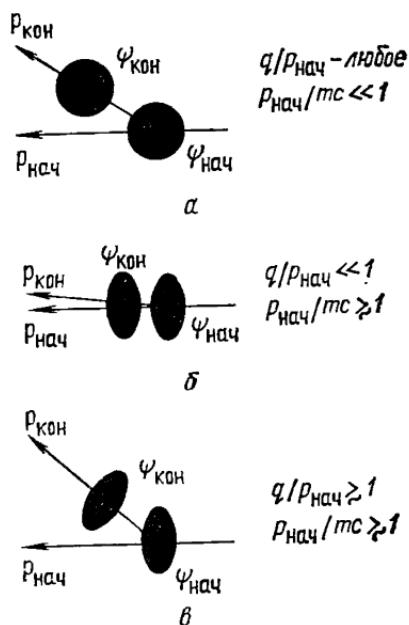


Рис. 3. Волновые функции частицы-мишени до и после взаимодействия:

a — взаимодействие в нерелятивистской области, когда частица не испытывает лоренцева сжатия и $\psi_{\text{кон}} = \psi_{\text{нач}}$; *b* — взаимодействие релятивистских частиц с малой передачей импульса $q = |\mathbf{p}_{\text{кон}} - \mathbf{p}_{\text{нач}}|$; в этом случае эффект лоренцева сжатия весьма существует, однако $\psi_{\text{кон}} \approx \psi_{\text{нач}}$; *c* — взаимодействие релятивистских частиц с большой передачей импульса, когда $\psi_{\text{кон}} \neq \psi_{\text{нач}}$

факторы следует, по-видимому, связывать не непосредственно с фурье-компонентой плотности $\rho(x)$, а с параметрами волновой функции, описывающей частицу.

Один из возможных подходов заключается в том, чтобы лоренцевы сжатые волновые функции частицы-мишени в матричном элементе $\langle \Psi_{\text{ков}}(x) | M | \Psi_{\text{нач}}(x) \rangle$ разложить по некоторой заданной полной системе состояний Ψ_n :

$$\Psi = \sum_n a_n \Psi_n \quad (9)$$

с амплитудами a_n , определяемыми из сравнения с экспериментальными значениями форм-фактора. Правда, практическая реализация такой программы также встречает пока затруднения, но эти затруднения носят не принципиальный, а технический характер*.

Трудности форм-факторного подхода к описанию опытов по структуре элементарных частиц еще больше возрастают в следующих приближениях теории, когда для описания эксперимента используют более детальные аналитические выражения. Например, электромагнитная структура протона и нейтрона в первом приближении по постоянной тонкой структуры $a \equiv e^2/hc \approx 1/137$ описывается двумя зарядовыми и двумя магнитными форм-факторами, в следующем же приближении ($\sim a^2$) для этого требуется уже свыше двух десятков форм-факторов [14]. Это обусловлено грубостью современного подхода к описанию экспериментов, содержащего слишком много феноменологических элементов. Дальнейшее совершенствование теории и, в частности, привлечение различных моделей уменьшает произвол.

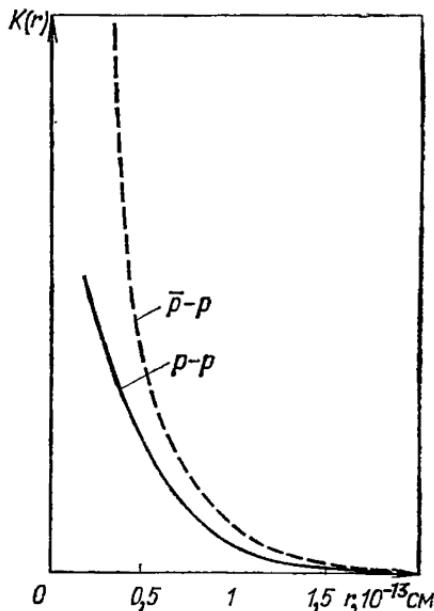
Оставим обсуждение трудностей пространственно-временной интерпретации структурных форм-факторов частиц на данной стадии, так как более подробное рассмотрение увлекло бы нас далеко в глубь теории поля. Подчеркнем лишь, что независимо от того, применяется ли для описания пространственной протяженности частиц функция (6) или же для этого будет использована другая величина, имеющая более наглядный и прозрачный физический смысл, во всех случаях пространство и время не теряют своего смысла. В настоящее время нет абсолютно никакой необходимости отказываться от пространственно-временных представлений в области субатомных явлений, на чем настаивают некоторые физики

* В частности, очень важно правильно выбрать набор основных состояний Ψ_n , так как иначе для описания экспериментальных данных в разложении волновой функции придется учитывать очень большое число членов. Например, для описания электромагнитных форм-факторов нуклонов при не слишком больших значениях q в качестве состояний, дающих основной вклад, удобно использовать резонансные двухчастичные состояния $(N+\rho)$, $(N+\omega)$, $(N+\eta)$, а вклад многочастичных состояний, ответственных за структуру центральных областей нуклона (его ядра), приближенно аппроксимировать константой (δ -функцией в пространстве x).

и философы. Безотносительно к философским позициям этих авторов такой отказ представляет собой сейчас чисто теоретическую спекуляцию.

В частности, нельзя согласиться с утверждениями, что «для того, чтобы получить полный базис для анализа субатомной вселенной (...), нет нужды использовать что-либо, кроме импульса и энергии» [50, с. 4, 5]. Такие физические величины, как средний квадратичный радиус элементарных частиц, их поляризуемость в электрическом и магнитном полях, размер керна — центральной

Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения от расстояния между сталкивающимися частицами. Сплошная и пунктирная кривые получены соответственно из опытов с рассеянием протонов и антiproтонов на протонах. На расстояниях $r \gtrsim 10^{-13}$ см кривые близки друг к другу, из чего можно заключить, что структура периферических областей в протоне и антiproтоне приблизительно одинакова. При столкновении кернов протона и антiproтона происходит аннигиляция и коэффициент $K(r)$ резко возрастает, поэтому расстояние $r \approx 0,5 \cdot 10^{-13}$ см приблизительно равно удвоенному радиусу керна. Вывод о резком возрастании поглощения при малых r следует также из опытов с упругим рассеянием мезонов на протонах



области внутри частицы, свойства которой существенно отличаются от свойств периферической части (рис. 4), дают весьма важную объективную информацию о свойствах микрообъектов. Все эти величины измеримы и в пределах экспериментальных погрешностей имеют одно и то же значение в самых различных экспериментах.

Более того, для интерпретации недавних экспериментальных данных о поведении форм-факторов протонов при очень больших, релятивистских значениях передаваемого импульса снова потребовалось привлечь пространственную картину, согласно которой нуклон состоит из нескольких очень малых, практически точечных частиц — компонент (партонов, как их иногда называют); лишь в этом случае удается понять результаты измерений и согласовать их с данными других опытов.

Все утверждения о том, что в применении к элементарной частице понятие структуры является всего лишь «выражением на-

личия определенных особенностей в аналитическом поведении амплитуд соответствующих процессов», отражают только формальную сторону дела. Это относится, в частности, и к известному высказыванию Чу: «Когда я говорю о каких-либо частных «конфигурациях» в нуклонной структуре, в действительности имеются в виду определенные простые сингулярности в соответствующих амплитудах рассеяния $\langle \dots \rangle$, когда я говорю о возможном «керне» в зарядовой структуре, я фактически имею в виду поведение амплитуды электронно-протонного рассеяния при больших передачах импульса, требующее вычитания в дисперсионных соотношениях» [50, с. 5]. Подробные высказывания имеют декларативный характер и по существу их автор не принимает во внимание реальную экспериментальную ситуацию.

Обратимся теперь к результатам недавних экспериментальных исследований, посвященных поискам отклонений от известных пространственно-временных отношений (в частности, поискам элементарной длины) в электромагнитных явлениях, разыгрывающихся в области $\Delta x \leq 10^{-13}$ см. (Напомним, что в предыдущем разделе обсуждение электромагнитных явлений было ограничено масштабами $\Delta x > 10^{-13}$ см.)

Изучение электромагнитных явлений с этой точки зрения очень интересно, так как квантовая электродинамика представляет собой хорошо разработанную теорию, которая, как мы видели, позволяет с высокой степенью точности выполнять расчеты, благодаря чему можно надеяться зафиксировать даже небольшие отклонения от заложенных в ее основу законов.

В различных лабораториях было выполнено большое число экспериментов с электромагнитными взаимодействиями. Ни в одном из них не обнаружены какие-либо отклонения от предсказаний теории*; другими словами, если такие отклонения и существуют, они не превосходят погрешности измерений. Поэтому сейчас можно говорить не о нарушении квантово-электродинамических законов, а о границе пространственно-временных интервалов, до которых эти законы проверены.

Чтобы оценить эту границу, надо сравнить теоретические выражения для различных электромагнитных эффектов с участием лептонов, в которые формально введены форм-факторы $\mathcal{F}(q)$, с экспериментальными. Отличие этих форм-факторов от единицы при значениях передаваемого импульса q , больших некоторого $q_{\text{кр}}$, указывало бы на нарушение известных законов квантовой электродинамики на расстояниях $\Delta x \leq \hbar/q_{\text{кр}}$.

Следует подчеркнуть, что если в процессе принимают участие одни только лептоны и нет сильно взаимодействующих частиц, то

* В литературе неоднократно сообщалось об обнаружении таких расхождений. Однако каждый раз в результате детального анализа точности использованных для сравнения теоретических формул и методических погрешностей эксперимента противоречия устранились.

отклонение форм-фактора $\mathcal{F}(q)$ от единицы заведомо нельзя приписать влиянию электромагнитной структуры частиц (как это делается, например, при рассеянии электрона на протоне), так как плотность облаков виртуальных частиц, образующих структуру, в этом случае значительно ниже порога точности проводимых измерений. (При рассеянии электрона на протоне положение совершенно иное, так как протон в отличие от электрона испытывает не только электромагнитные, но и сильные взаимодействия.)

Поскольку в настоящее время речь может идти лишь о небольших отклонениях $\mathcal{F}(q)$ от единицы, то конкретный вид форм-фактора совершенно не важен: в самом общем случае

$$\mathcal{F}(q) = 1 \pm a^2 q^2 + \text{члены порядка } q^4 \quad (10)$$

(из соображений релятивистской инвариантности форм-фактор должен быть четной функцией импульса q).

В некоторых работах для определения $q_{\text{кр}}$ в сравниваемые с опытом теоретические выражения вместо кулоновского потенциала $V_{\text{кул}}(r) = e/r$ вводят обобщенный потенциал $V(r) = V_{\text{кул}}(r) [1 \pm \exp(-r/a)]$ с короткодействующей добавкой $\exp(-r/a)$. Однако в импульсном представлении это опять-таки соответствует форм-фактору

$$\mathcal{F}(q) = 1 \pm a^2 q^2 / (1 - a^2 q^2) \approx 1 \pm a^2 q^2. \quad (11)$$

Тщательный анализ различных электродинамических величин — аномального магнитного момента частиц, расщепления уровней различных атомов, сечения процессов рассеяния и неупругих реакций показал, что в пределах точности современных экспериментов верхняя граница возможных нарушений законов квантовой электродинамики $\Delta x = \hbar/q_{\text{кр}}$ расположена где-то около 10^{-15} см, т. е. на расстояниях, которые по крайней мере в 50—100 раз меньше среднего геометрического размера нуклона, и около $\Delta t = \hbar/q_{\text{кр}}c \sim 10^{-25}$ сек.

Таким образом, включая классическую область применимости максвелловских уравнений, квантовая электродинамика оказывается справедливой в колоссальном (более 30 порядков величины) диапазоне масштабов, от космических расстояний $R \sim 5 \times 10^{17}$ см до интервалов $\Delta x \sim 10^{-15}$ см, характерных для области сильных взаимодействий. Любое изменение известных законов электродинамики в этом диапазоне масштабов сразу же приводит к противоречиям с опытом.

Важно подчеркнуть, что проверка квантовой электродинамики ограничена сейчас главным образом точностью теоретических расчетов, а не точностью эксперимента, которая в ряде случаев исключительно высока.

Как и всякая физическая теория, описывающая вполне конкретные свойства материи, квантовая электродинамика не может

быть применимой в любых, сколь угодно малых пространственно-временных областях; однако в ней не содержится какой-либо универсальной постоянной размерности длины, которая ограничивала бы область ее применимости. Бесконечно большой вклад процессов, происходящих в очень малых интервалах Δx и Δt , устраняется из теоретических выражений с помощью перенормировки. Анализ устраниемых перенормировкой расходящихся величин находится вне рамок современной теории.

Перейдем теперь к важному вопросу о несохранении пространственной и временной четности в субатомных микропроцессах.

В середине 50-х годов серией опытов с распадами элементарных частиц и атомных ядер было установлено нарушение пространственной четности в слабых взаимодействиях. Обнаруженное первоначально в β -распадах ядер кобальта это явление наблюдалось затем практически во всех известных нам процессах слабых взаимодействий. Процессы, обусловленные слабыми взаимодействиями, оказались инвариантными лишь по отношению к одновременному преобразованию пространственной инверсии P и зарядового сопряжения C .

Сохранение комбинированной CP -четности с высокой степенью точности подтверждено большим числом различных экспериментов.

Тем более поразительным и неожиданным был доложенный в 1964 г. на Международной конференции в Дубне вывод об экспериментальном обнаружении распада K^0_L -мезона на пару $\pi^+ + \pi^-$, в котором комбинированная четность начального состояния ($CP = -1$) не совпадала с комбинированной четностью конечного состояния ($CP = +1$)*. На тысячу сохраняющих комбинированную CP -четность трехпионных распадов K^0_L -мезонов приходится два — четыре CP -неинвариантных распада $K^0_L \rightarrow 2\pi$. В соответствии с теоремой Паули и Людерса это означает, что распады K^0_L -мезонов неинвариантны также и по отношению к изменению знака времени.

* В том, что комбинированная четность этих двух состояний различна, легко убедиться путем следующих простых рассуждений. Поскольку K - и \bar{K} -мезоны — псевдоскалярные частицы, то при P -преобразовании волновые функции $\Psi(K^0) \rightarrow \Psi(K_0)$ и $\Psi(\bar{K}^0) \rightarrow \Psi(\bar{K}^0)$; при зарядовом отражении $\Psi(\bar{K}^0) \rightarrow -\Psi(K^0)$ и $\Psi(K^0) \rightarrow \Psi(K^0)$. В результате при PC -преобразовании волновая функция K^0_L -мезона, представляющего собой суперпозицию K^0 - и \bar{K}^0 -мезонов, меняет знак:

$$\Psi(K^0_L) \equiv 2^{-1/2} [\Psi(K^0) - \Psi(\bar{K}^0)] \rightarrow 2^{-1/2} [-\Psi(\bar{K}^0) + \Psi(K^0)] \equiv -\Psi(K^0_L).$$

Волновая функция конечной системы при этом знака не меняет:

$$\Psi_{\text{кон}} \equiv \Psi(\pi^+) \Psi(\pi^-) \rightarrow [-\Psi(\pi^-)] [-\Psi(\pi^+)] = \Psi(\pi^+) \Psi(\pi^-).$$

Аналогичным образом можно убедиться в нарушении CP -инвариантности при распадах $K^0_L \rightarrow 2\pi^0$, которые тоже наблюдаются экспериментально.

В последующем были обнаружены еще два процесса с нарушением комбинированной инвариантности: распады

$$K^0_L \rightarrow \pi^\pm + e^\mp + \nu_e \text{ и } K^0_L \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp + \nu_\mu$$

с асимметрией зарядов

$$\Delta N_e = N(e^+) - N(e^-) \neq 0 \text{ и } \Delta N_\mu = N(\mu^+) - N(\mu^-) \neq 0$$

[$N(x)$ — число частиц типа x] [53, 54].

Физическая причина этого интересного явления остается еще до конца не выясненной.

Прежде всего обращает на себя внимание то, что наблюдаемый эффект нарушения CP -инвариантности очень мал — всего лишь доли процента — и проявляется только в весьма специфических условиях, где благодаря особенностям K^0 - и K^0 -мезонов можно с помощью интерференции получить чрезвычайно высокую точность измерений.

Все попытки обнаружить нарушение CP - (или T -) четности в других процессах с участием слабых взаимодействий не привели к успеху. Например, в распаде нейтрона $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ CP -неинвариантная добавка составляет $0,7 \pm 0,7\%$ [51], а в распаде ядра неона $^{19}\text{Ne} \rightarrow ^{19}\text{F} + e^+ + \nu$ — всего лишь $0,1 \pm 0,9\%$ [52]. В пределах экспериментальных погрешностей никакие указания на нарушение CP - или T -инвариантности не замечены [37, 55].

Однако для объяснения наблюдаемой аномалии в распаде K^0_L -мезона вполне достаточно, чтобы CP -неинвариантная часть амплитуды слабого взаимодействия составляла всего лишь одну миллионную долю полной амплитуды (около $10^{-4}\%$), что значительно меньше погрешностей, с которыми выполняются сейчас все другие эксперименты со слабыми взаимодействиями.

Вместе с тем неинвариантные члены приблизительно такого значения возникают в «единых теориях», объединяющих электромагнитное и слабое взаимодействие [56—58]. Эти члены, связанные с виртуальными процессами обмена тяжелыми промежуточными мезонами, существенны в области ультрамалых масштабов Δx , а при обычных условиях дают очень малый вклад.

С феноменологической точки зрения все выглядит так, как если бы к слабому взаимодействию было «подмешано» некоторое дополнительное CP -неинвариантное «миллислабое» взаимодействие.

Возможно, что именно таким образом удастся объяснить наблюдаемый эффект CP -неинвариантности в распадах K -мезонов, хотя полной уверенности в этом пока еще нет, так как единые теории недостаточно проверены экспериментом.

Другое возможное объяснение нарушения CP -инвариантности в K^0 -распадах связано с гипотезой о существовании еще одного типа взаимодействий — так называемого сверхслабого взаимодей-

ствия, происходящего в отличие от обычного слабого взаимодействия с нарушением всех трех инвариантностей: C , T и P [59]. Благодаря сверхслабому взаимодействию, относительное значение амплитуды которого должно составлять всего лишь около 10^{-7} — 10^{-8} CP -инвариантной амплитуды (это соответствует исключительно малой постоянной связи $G = (10^{-7} \div 10^{-8}) G_0$, где G_0 — постоянная связи слабого взаимодействия), становится возможен переход CP -нечетного K^0_L -мезона в CP -четный K^0_S -мезон*, который и распадается далее на два π -мезона под действием обычного CP -инвариантного слабого взаимодействия**.

Аномальные распады K^0_L -мезонов могли бы происходить и за счет небольшого нарушения комбинированной или временной инвариантностей в электромагнитных или сильных взаимодействиях, примесь которых всегда имеется в виртуальных промежуточных состояниях и поэтому дает некоторую добавку к вероятностям распадов. Оценки показывают, что для объяснения K^0_L -распадов вполне достаточно, чтобы CP -нейтринная часть амплитуды электромагнитного или сильного взаимодействия составляла около 0,1% [37, 60, 61].

В случае электромагнитных процессов такая добавка достаточно надежно исключается известными экспериментальными фактами (см. § 3). Ни в одном из опытов с сильными взаимодействиями частиц также не было замечено никаких нарушений CP -или T -инвариантности.

Например, сравнение вероятностей реакций $d + {}^{16}\text{O} \rightleftharpoons {}^{14}\text{N} + \alpha$ и $d + {}^{24}\text{Mg} \rightleftharpoons p + {}^{25}\text{Mg}$ показало, что соотношение детального баланса, а следовательно, и T -инвариантность, выполняются с погрешностью 0,3% [62, 63]. Обусловленная нарушением T -инвариантности угловая асимметрия в рассеянии $p + {}^{13}\text{C} \rightarrow p + {}^{13}\text{C}$ составляет $(0,8 \pm 2,5)\%$ [64]. В пределах экспериментальных погрешностей ($\pm 1\%$) не обнаружено никакой зарядовой асимметрии у мезонов, рождающихся при аннигиляции антiproтонов на протонах [65, 66] и т. д. Однако для окончательных выводов точность этих опытов надо повысить еще приблизительно на порядок (если нарушающее C - и T -инвариантность сильное взаимодействие происходит с эффективной постоянной $10^{-3} g$, где g — постоянная «обычного» сильного взаимодействия).

* Волновая функция K^0_S -мезона

$$\psi(K^0_S) = 2^{-1/2} [\psi(K^0) + \psi(\bar{K}^0)].$$

Легко убедиться в том, что $CP \psi(K^0_S) = \psi(K^0_S)$ (см. примечание на с. 48).

** Конечно, нельзя исключить, что гипотеза о существовании сверхслабого взаимодействия служит всего лишь для приближенного феноменологического описания очень малых эффектов слабого взаимодействия. Подобно миллисекундному взаимодействию сверхслабое взаимодействие, по-видимому, может возникать в некоторых вариантах единых теорий, которые теряют C -, P - и T -инвариантность в очень малых областях Δx и Δt . Это более предпочтительно, чем введение принципиально нового типа взаимодействия.

Различные авторы предлагали ряд других, более экзотических объяснений аномальных K^0_L -распадов. (Например, серьезно обсуждалась возможность существования еще не обнаруженного в опытах дальнодействующего «космического поля», которое было бы ответственно за CP -инвариантные превращения $K^0_L \rightarrow K^0_S$.) Однако эти гипотезы или не согласовались с опытом, или были слишком уж искусственными и трудными для проверки.

Гипотезы о миллислабом и сверхслабом взаимодействиях представляются в настоящее время наиболее правдоподобными.

Понятно, что установление неэквивалентности правого и левого пространственных направлений и двух противоположных направлений времени представляет собой существенное изменение наших пространственно-временных представлений. Философский смысл этих изменений осознан еще далеко не до конца.

Вместе с тем следует еще раз подчеркнуть, что эффект нарушения P - и C -четности обусловлен слабым, а нарушение T -четности даже сверхслабым взаимодействием, поэтому в области субатомных интервалов, доступных сейчас на ускорителях и в большинстве опытов с космическим излучением, эти эффекты составляют лишь очень малую, часто лежащую на грани современных экспериментальных возможностей поправку к основным, сильным и электромагнитным взаимодействиям, и знакомые нам полярные пространственно-временные отношения «лево — право» и «раньше — позже» не теряют своего смысла в рассматриваемой области Δx и Δt . Теоретические оценки подсказывают, что эти отношения полностью утратят свой смысл лишь в пространственно-временных интервалах, меньших $10^{-16}—10^{-17}$ см и $10^{-27}—10^{-28}$ сек, где вероятность слабых взаимодействий, по-видимому, становится сравнимой с вероятностями электромагнитных и сильных взаимодействий.

Наоборот, в области больших масштабов нарушающие C -, P -, T -инвариантность процессы позволяют однозначно установить, какой из микрообъектов является частицей, а какой — античастицей, и однозначно определить понятие левого и правого, одинаково справедливое как для нашего мира, так и для антимира: правым называют направление вращения винта, вдоль оси которого вылетают частицы в опыте с распадом радиоактивного кобальта, а античастицей (позитроном) называют ту частицу, которая чаще образуется при распаде долгоживущих K^0 -мезонов. Выбор одной античастицы позволяет далее однозначно разделить и все другие типы микрообъектов на частицы и античастицы.

Доступная нам сейчас на ускорителях область субатомных явлений, связанных с процессами внутриэлементарных частиц, $\Delta x \sim 10^{-13}—7 \cdot 10^{-16}$ см и $\Delta t \sim 10^{-23}—10^{-26}$ сек расположена на много порядков «глубже», чем область чисто квантово-электродинамических процессов. Тем не менее, если не считать явлений, связанных со слабыми взаимодействиями, в пределах точности современных экспериментов пространственно-временные соотноше-

шля не претерпевают здесь сколько-нибудь радикальных изменений. По-прежнему все процессы можно описывать на языке релятивистски инвариантных пространственно-временных или на языке формально эквивалентных им четырехмерных импульсных переменных. В частности, нельзя согласиться со встречающимися иногда в литературе утверждениями о том, что «в области сильных взаимодействий пространство выступает с рядом специфических свойств, которые отражены в понятии изотопического спина». В работе В. С. Готта и А. Ф. Перетурина [67] этот вывод обосновывается тем соображением, что «поворот на 180° (в пространстве изотопического спина — В. Б.) превращает протон в нейtron, а нейtron в протон; возможность такой интерпретации симметрии изотопического спина <...> ясно указывает на то, что эта симметрия связана с определенными пространственными формами» [67, с. 64]. Однако на основании подобия геометрических преобразований в пространствах *различной физической природы* еще нельзя сделать заключения о непосредственной связи этих пространств. Одна и та же группа преобразований может иметь место и в конфигурационном пространстве $\{x, t\}$, и в каких-то совершенно абстрактных математических пространствах.

Связь между координатами $\{x, t\}$ и пространствами изотопического спина, странности, гиперзаряда и других квантовых чисел можно видеть лишь в том, что все эти пространства описывают свойства частиц, реально существующих в конфигурационном пространстве $\{\bar{x}, \bar{t}\}$. Поэтому преобразования, выполняемые, например, в изотопическом пространстве, должны касаться только тех частиц, которые находятся в определенной пространственно-временной области, и не затрагивать всего бесконечного пространства времени. Аппарат теории должен быть построен таким образом, чтобы автоматически удовлетворять этому требованию (см. с. 117 и далее).

До сих пор речь шла об интервалах Δx и Δt , которые можно получить на современных ускорителях. Сведения о характере пространственно-временных отношений в области еще меньших масштабов в настоящее время можно получить лишь из опытов с космическим излучением. Хотя эти опыты весьма неточны и дают лишь грубо-ориентировочные сведения, известные сейчас экспериментальные данные указывают на то, что в интервалах Δx и Δt , приблизительно еще на порядок меньших тел, что достигнуты с помощью ускорителей (т. е. при энергиях до 10^4 Гэв), свойства взаимодействий элементарных частиц в общих чертах остаются, по-видимому, такими же, как на больших расстояниях Δx . Это указывает и на устойчивость основных известных нам пространственно-временных свойств вплоть до интервалов 10^{-16} см и 10^{-26} сек.

К этому выводу, конечно, следует относиться с большой осторожностью, так как не исключено, что свойства пространства — времени остаются приближенно неизменными только лишь в сред-

нем, подобно тому как многие квантово-механические явления в среднем можно приближенно описать классическими законами (напомним теоремы Эренфеста). Для более определенных заключений необходимы значительно более детальные и точные эксперименты, грубых усредненных экспериментальных данных для этого заведомо недостаточно.

Рассмотрим теперь последнюю, наиболее «глубокую» область пространственно-временных интервалов, о которых еще можно составить какое-то представление на основе отрывочной информации, даваемой нам опытами с космическими частицами сверхвысоких энергий, и путем экстраполяции данных, относящихся к явлениям, происходящим на больших расстояниях и при больших длительностях.

§ 5. Свойства пространства и времени в области ультрамальных масштабов $\Delta x \leq 10^{-16}$ см и $\Delta t \leq 10^{-26}$ сек

Анализ экспериментальных данных в области энергий современных ускорителей приводит к выводу о том, что при энергиях, больших нескольких десятков гигаэлектронвольт (т. е. при $\Delta x \leq 5 \cdot 10^{-15}$ см), устанавливается некоторый «простой режим» в энергетической зависимости различных характеристик сильных взаимодействий: поведение этих характеристик становится монотонным, в ряде случаев они выходят почти на плато («выполаживаются», как принято сейчас говорить).

Вместе с тем в опытах с космическим излучением постепенно накапливаются данные, которые указывают на то, что при энергиях 10^5 — 10^6 Гэв ($\Delta x \sim 10^{-16}$ см), по-видимому, начинают проявляться какие-то существенно новые физические закономерности, и это сказывается на характере взаимодействий элементарных частиц. Так, ряд факторов показывает, что в этой области с большой вероятностью происходит рождение фейрболов (огненных шаров) — чрезвычайно короткоживущих образований, распадающихся на большое число вторичных частиц, главным образом π -мезонов. Масса таких фейрболов составляет несолько нуклонных масс, но в отдельных случаях может достигать двух десятков нуклонных масс и более. Другим труднообъяснимым с точки зрения «традиционных» предсказаний фактом является наблюдавшийся многими авторами аномальный тип излома в форме спектров γ -квантов и ядерно-активной компоненты ливней, порождаемых космическими частицами. В некоторых работах отмечалось резкое возрастание неупругости взаимодействий высокогенергетических частиц и т. д.

Правда, все эти факты еще нельзя рассматривать как твердо установленные. В частности, критический анализ экспериментальных работ, касающихся наблюдений огненных шаров, как правило, обнаруживает множество методических погрешностей и не-

явных предположений, используемых авторами при интерпретации результатов их измерений. При чтении этих работ иногда трудно избежать впечатления, что выводы о существовании в природе огненных шаров пока еще в значительной степени являются результатом большой веры авторов в некоторые заранее известные им гипотетические модели. Тем не менее в целом ситуация становится все более и более настораживающей, особенно если учесть, что несмотря на постоянное скептическое отношение к выводам из опытов с космическим излучением, именно эти опыты предсказали все наиболее фундаментальные изменения наших представлений о субатомных явлениях, начиная от открытия мезонов и странных частиц и кончая простым режимом элементарных взаимодействий при высоких энергиях.

Указания на существенное изменение пространственно-временных отношений в интегралах $\Delta x \leq 10^{-16}$ см следуют также из анализа теоретических соотношений, хорошо описывающих эксперимент в области больших масштабов. Как уже отмечалось выше, следует ожидать, что при $\Delta x \leq 10^{-16}$ см вероятность слабых взаимодействий станет сравнимой с вероятностями электромагнитных и сильных взаимодействий, поэтому большое значение приобретут эффекты, связанные с несохранением пространственной, зарядовой, а возможно, и временной четности. Очень заметно здесь будет проявляться структура лептонных частиц, обусловленная их виртуальными взаимодействиями; в частности, электрон при этом уже нельзя будет считать точечной частицей*.

На изменение свойств слабых взаимодействий при $\Delta x \sim 10^{-16}$ см указывает также ограничение применимости четырехфермионного формализма слабых взаимодействий, содержащего «фундаментальную» постоянную $I_0 = \sqrt{G^2/\hbar c} = 7 \cdot 10^{-17}$ см.

Вместе с тем разработанная недавно единая теория электромагнитных и слабых взаимодействий, в которой нет формальных ограничений на рассмотрение явлений при $\Delta x < 10^{-16}$ см, не содержит никаких новых предположений о свойствах микроскопического

* В брошюре А. С. Компанейца [68] электрон приведен в качестве примера физического объекта, свойства которого целиком определяются всего лишь одним типом взаимодействия — в данном случае электромагнитным — и поэтому могут быть за некоторый конечный отрезок времени познаны полностью, до конца. «Оказалось, — говорится на с. 30 брошюры [68], — что даже при длинах волн 10^{-20} см и меньше электрон не проявляет никаких структурных свойств и ведет себя, как заряженная точка. Между тем ядерные силы действуют на расстояние порядка 10^{-13} см <...>. Существующая разница между электроном и ядерными частицами позволяет полагать, что электрон — чисто электромагнитный объект». Эти утверждения основаны на недоразумениях: во-первых, как показано в § 1, наши экспериментальные возможности ограничены (и еще долго останутся таковыми) областью масштабов Δx , значительно меньших 10^{-20} см (интервал $\Delta x = 10^{-20}$ см соответствует фантастически высокой энергии $E \sim 10^{11}$ Гэв); во-вторых, говорить о «точечности» электрона — это значит не обращать внимания на современную теорию слабых взаимодействий. Электрон столь же неисчерпаем в своих свойствах, как и любая другая элементарная частица.

пространства — времени по сравнению с тем, что нам уже известно*. Не содержат принципиально новых идей о свойствах пространства — времени и более общие варианты единых теорий, объединяющие сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия и претендующие на рассмотрение интервалов $\Delta x \sim 10^{-19}$ см (такова комптоновская длина волны h/Mc некоторых использующихся в этой теории «промежуточных» тяжелых частиц) [70, 71].

Лишь эксперимент покажет, насколько оправдан такой консерватизм для ультрамалых пространственно-временных интервалов.

В литературе имеется много различных неподтвержденных экспериментом утверждений о свойствах пространства — времени в ультрамалых областях. Так, в монографии [19, с. 299] указано, что в этих областях теряют прежний смысл такие основные понятия макроскопического пространства, как понятие расстояния, интервала времени и т. п.; утверждается, что понятие кривизны пространства приобретает здесь совсем другой смысл (см. [72, с. 139]); в работе [47, с. 342] подчеркивается принципиальная невозможность отличить правое от левого и т. д. Против этих утверждений трудно что-либо возразить, если использовать их в сочетании со словом «возможно» и отнести к области недостигнутых еще экспериментальных точностей; к исследованной же области пространства — времени эти утверждения не применимы.

Несмотря на то что теория элементарных частиц сейчас еще недостаточно разработана и по-существу представляет собой лишь собрание отдельных более или менее удачных фрагментов (иногда очень приближенного, грубо-модельного характера), нам не известно ни одного экспериментального факта, который был бы совершенно не объясним с точки зрения современных физических представлений, подобно тому, как это было, например, с опытом Майкельсона или с излучением черного тела на рубеже XIX—XX вв. Это обстоятельство является совершенно поразительным. По-видимому, дело здесь в том, что наши представления о свойствах субатомных явлений во многих случаях имеют пока скорее качественный, чем количественный характер; положение изменится при переходе к большим точностям измерений и меньшим пространственно-временным масштабам.

§ 6. О концепции «макроскопического пространства — времени»

Существенное отличие квантовых закономерностей от привычных и поэтому кажущихся нам такими естественными законов классической физики, определенные трудности пространственно-временной интерпретации некоторых характеристик микрообъектов и то обстоятельство, что в экспериментах с атомными ядрами и

* Простое и наглядное изложение этой теории можно найти, например, в обзоре В. Б. Берестецкого [69].

элементарными частицами мы, как правило, имеем дело не с пространственно-временными координатами x и t , а с энергией и импульсом — все это явилось причиной того, что некоторые авторы, как философы, так и физики, пришли к выводу об исключительно макроскопической природе пространства и времени. По их мнению достаточно корректная и последовательная интерпретация квантовых законов показывает, что пространственно-временные представления (в частности, само понятие пространственно-временного континуума) неприменимы или, по крайней мере, излишни в области микроявлений; пространство и время возникают как усредненный результат интерференции огромного числа взаимодействий микрочастиц, заполняющих Вселенную, подобно тому, как, например, термодинамические свойства веществ являются следствием взаимодействий отдельных составляющих их атомов и молекул и характеризуют эти взаимодействия макроскопически, в среднем. Что же касается отдельных микроскопических объектов и систем, то они «должны описываться в абстрактных понятиях (заряд, спин, масса, странность, другие квантовые числа), не имеющих никакого отношения к пространству и времени» [73, с. 101].

Подобная точка зрения на пространство и время далеко не нова. Еще в начале 30-х годов Эддингтон писал: «Для постояний, характеризуемых небольшими квантовыми числами, обычная физическая терминология оказывается непригодной и пользование ею (без чего сейчас нельзя обойтись) ведет к ряду противоречий. Для таких постояний пространство и время не существуют — по крайней мере у меня нет никаких оснований предполагать их существующими. Но для постояний с большими квантовыми числами новая схема должна давать нечто аналогичное обычным понятиям пространства и времени, т. е. нечто переходящее в пространство и время при безграничном возрастании этих чисел» [74, с. 119]. (см. также [75, 76]). В последующем аналогичные идеи высказывали Ван Дантциг, Вигнер и др. [77, 78]. Особую популярность эти идеи приобрели в связи с успехами, достигнутыми физикой элементарных частиц на основе анализа аналитических свойств матрицы рассеяния: ее аналитичности в зависимости от переменных энергия — импульс, положения ее полюсов в плоскости комплексных угловых моментов и т. д.

В поддержку концепции «макроскопической природы» пространства и времени приводят как чисто квантово-механические соображения, так и более сложные аргументы из теории поля и физики элементарных частиц.

Некоторые авторы (см. упоминавшиеся уже выше работы И. С. Алексеева [11, 12, 15], статью Циммермана [73] и др.) считают, что пространственно-временные понятия теряют свой смысл уже на уровне молекулярно-атомных масштабов $\Delta \approx 10^{-8}$ см, $\Delta t \approx 10^{-18}$ сек в силу ограничений, накладываемых законами нерелятивистской квантовой механики. Как показывает анализ, этот вывод является следствием весьма свободного толкования кванто-

вых соотношений; при более тщательном рассмотрении никаких трудностей с пространственно-временными переменными не возникает. Работы И. С. Алексеева с этой точки зрения обсуждались уже в § 2*. Что касается статьи Циммермана, то основное ее утверждение о том, что «невозможно измерить (или указать операционально) временные промежутки и расстояния в пространстве с точностью, хотя бы отдаленно приближающейся к той, что допускается принципом неопределенности» [73, с. 101], также не выдерживает критики. Как было неоднократно отмечено выше, законы квантовой механики позволяют производить в опытах с микрообъектами измерения интервалов $\Delta x \geq \hbar$ и $\Delta t \geq \hbar/c$, значения которых лимитированы только кинетической энергией частицы **.

С выводом о неприменимости пространственно-временных представлений в нерелятивистской квантовой механике не согласен и Чу, который сам является одним из сторонников концепции макроскопического пространства — времени. По его мнению сама по себе «нерелятивистская квантовая механика разрешает экспериментальное исследование пространственно-временного континуума. То, что накладывает абсолютный предел на нашу способность определять положение — это релятивистская эквивалентность массы и энергии. Если грубо описывать предельно тонкую ситуацию, то можно сказать, что когда фотон (или какая-либо другая частица, используемая в качестве пробного тела) имеет энергию, большую массы покоя частицы, с которой он взаимодействует, в процессе столкновения, реализующего измерение, рождаются новые частицы и вся ситуация изменяется. Мы не можем даже сказать, что же это за объект, положение которого мы измеряем. Так как дилемма возникает для энергий пробной частицы порядка mc^2 или импульса порядка mc , то критическая длина волны равна \hbar/mc , где m — масса наиболее тяжелой частицы, которая может рождаться при измерении» [79, с. 2].

Однако подобные соображения о существовании абсолютного предела измерений интервалов Δx и Δt сразу же вызывают возражение: неупругие процессы порождают дополнительное упругое рассеяние, экспериментальное исследование которого позволяет получить сведения о свойствах пространственно-временной структуры вплоть до масштабов $\Delta x \sim \hbar$ и $\Delta t \sim \hbar/c$. Наглядно это можно представить себе следующим образом: в первоначально плоском

* Хотя основной вывод И. С. Алексеева о существенно макроскопической природе пространства — времени встречает возражения, выполненный им анализ статуса пространственно-временных представлений в микромире под углами зрения, необычными для философской литературы, представляет несомненный интерес. Он стимулировал острые дискуссии и в значительной степени содействовал более глубокому пониманию проблемы. Пользуюсь случаем поблагодарить И. С. Алексеева за обсуждения.

** Основанные на соотношении неопределенностей оценки Вигнера, приведенные в статье Циммермана, на самом деле не запрещают таких измерений.

фронте потока налетающих частиц образуется «дырка» вследствие поглощения этих частиц частицей-мишенью (рис. 5) *; это искажение фронта волны и воспринимается как рассеяние потока первичных частиц. Такое дифракционное или, как часто говорят, «теневое» рассеяние весьма чувствительно к интенсивности поглощения первичных частиц в различных точках пространства.

Несущественно и то обстоятельство, что процесс измерения может значительно изменить положение и свойства изучаемого объекта. В квантовой теории это характерно для любых измерений, а не только для измерений координат x, t . Трудности можно обойти, если учесть, что в эксперименте мы всегда имеем дело с ансамблем изучаемых объектов.

Рассуждения об абсолютной границе, за которой благодаря неустранимым неупругим процессам пространственно-временные понятия лишены всякого физического смысла, в последнее время перешли и в философскую литературу. Утверждения о том, что упругое рассеяние становится невозможным, когда длина деборильевской волны пробных частиц $\lambda \leq 10^{-13}$ см, повторяются, например, в работе П. С. Дышлевого и В. С. Лукьянца [80], на основании чего опять-таки делается вывод о том, что в субатомной области «квантово-механические утверждения о пространстве — времени лишаются физического смысла» [80, с. 30] **.

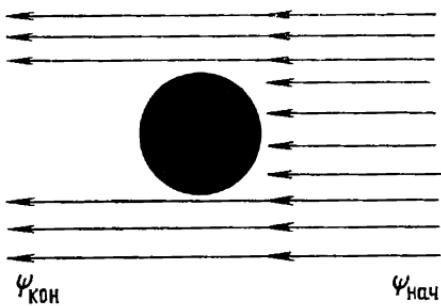


Рис. 5. Искажение фронта падающей волны $\Psi_{\text{нач}} = \exp(i p x)$ вследствие выбывания из пучка частиц, испытавших неупругое взаимодействие. В начальном состоянии все частицы имеют одинаковый импульс p . Конечное состояние представляет собой набор плоских волн $\exp(i k x)$ с различными значениями импульсов частиц k : $\Psi_{\text{кон}} = \sum_k a_k \exp(i k x)$. Это и означает, что произошло упругое рассеяние на угол $\cos \theta = kp/kp$, и падающая частица с вероятностью $|a_k|^2$ приобретает импульс k

В действительности же сечение упругого рассеяния с ростом энергии не уменьшается, а уже при энергиях, больших нескольких гигаэлектронвольт, становится постоянным и даже несколько возрастает (см. [45, 83]). Это — один из основных результатов физики элементарных частиц ***.

* Любой неупругий процесс выводит частицу из упругого канала и в этом смысле может рассматриваться как ее поглощение.

** Аналогичные взгляды высказываются в статье этих авторов [81] и в книге В. С. Лукьянца [82].

*** Что касается замечания о том, что аргументы Циммермана и Чу, приводимые ими в обоснование макроскопического характера пространства и времени, «признаются сейчас почти всеми физиками» [80, с. 28], то это не так.

Правда, по мнению авторов работы [80] «утверждение о макроскопической природе пространства относится не к реальности самой по себе, а к пространству как теоретическому описанию объективной реальности» [80, с. 35]. Однако это только запутывает дело. Когда речь идет о принципиальной невозможности экспериментального изучения свойств пространственных интервалов внутри некоторой области, то это — важнейший естественно-научный вывод о *свойствах природы* (правилен он или нет — это уже другой вопрос); этот вывод относится к реальному и не зависящему от нас миру, а не к теоретическим построениям. Именно в этом все дело. Если бы речь шла только о теории, то незачем было бы ломать копья. Можно придумать большое число различных теоретических описаний с весьма удивительными свойствами микроскопических пространства и времени или вообще без них (о таких построениях мы еще будем говорить в гл. 4), однако все эти теории будут иметь характер гипотез, нуждающихся в опытной проверке. В отличие от этого, заключения И. С. Алексеева, Чу, Циммермана и др. об исключительно макроскопической природе пространства — времени и существовании соответствующей границы, вне которой координаты x, t теряют свой смысл, *основаны* на экспериментальных данных и являются следствием последних (правильно или неправильно интерпретируются эти данные — это опять-таки другой вопрос).

Авторы работы [80] считают, что вывод о макроскопической природе пространства не относится к объективной реальности самой по себе, «ибо о последней можно сказать, что она «макроскопична», «микроскопична» или «мегаскопична» только после того, как она будет представлена в рамках определенной физической теории, устанавливающей смысл этих терминов в зависимости от выбора единицы измерения. Вне и независимо от физической теории, определяющей систему измерения, термины «микроскопический», «макроскопический» и т. д. просто лишены смысла, а поэтому бессмысленны и такие утверждения о макроскопичности пространства, которые относятся к объективной реальности, никак не представленной в какой бы то ни было физической теории» [80, с. 35].

Конечно, термины «макроскопический» и «микроскопический» весьма условны, однако безусловным и независящим от какой-либо теории является расстояние $l_0 = \hbar/mc$ (комптоновская длина волны наиболее тяжелой участвующей во взаимодействии частицы), определяющее согласно рассуждениям Чу абсолютную границу обоснованности пространственно-временных соотношений. При этом совершенно не важно, как называть область $\Delta x < l_0$, микроскопической или как-нибудь еще, важно, что существует *вполне определенная* область, внутри которой считается, что пространство теряет свой смысл.

Если пространство и время представляют собой форму бытия субатомной реальности, то они должны найти отражение в физи-

ческой теории и им не грозит участь рудимента, которая постигла теплород, эфир и флогистон — физические образы, которые оказались несуществующими в природе и представляющими собой лишь более или менее удобный способ описания известных в свое время экспериментальных данных. От того, что в отдельных, конкретных теориях (например, в теории *S*-матрицы, которую развивает Чу) может быть более удобным пользоваться не пространственно-временными, а какими-то другими переменными, пространство и время не перестанут существовать. Сама постановка вопроса, «состоит ли в теоретической физике будущего <...> всеобщность пространственно-временного способа теоретического представления объективной реальности» [80, с. 25], в этом случае представляется не совсем корректной*.

Важно подчеркнуть, что теоретические построения, в которых сделана попытка полностью отказаться от пространственно-временных координат, испытывают из-за этого трудности, вообще говоря, ничуть не меньшие, чем, например, при интерпретации форм-факторов в пространственно-временном подходе.

В частности, приходится постулировать как изначальное такое весьма специфическое свойство, как аналитичность матрицы рассеяния, в то время как при обычном пространственно-временном рассмотрении это свойство представляет собой следствие принципа микропричинности и может быть строго доказано. В теории, не содержащей координат x и t , частицы приходится определять чисто формально — как полюса матрицы рассеяния, и т. д. В целом теория ничуть не становится проще или последовательнее. Поэтому не случайно, что Чу на первой же странице цитированной выше работы [79] отмечает, что хотя концепция пространства — времени в современной субатомной физике, по его мнению, «играет роль, аналогичную той, которую играл эфир в макроскопической физике конца XIX столетия», тем не менее «никак нельзя показать, что пространственно-временной континуум не может существовать».

* В недавней работе Р. А. Аронова [84] дан обстоятельный разбор монографии В. С. Лукьянца [82], во многом совпадающей с приведенными выше критическими замечаниями.

Как подчеркивает Р. А. Аронов, «решение проблемы статуса концепций пространства — времени может вовсе не совпадать с решением той же проблемы статуса концепций флогистона, теплорода и классического эфира. Необходимо исследование, в котором речь пойдет не только о логико-гносеологическом аспекте проблемы, но также и об ее онтологическом аспекте, не только о понятиях пространства и времени, но и о том, что соответствует этим понятиям в объективной действительности, о пространстве и времени, существующих объективно реально, вне и независимо от какой бы то ни было теории. Исследование проблемы статуса концепций пространства и времени, ограничивающееся лишь ее логико-гносеологическим аспектом, естественно, не свидетельствует и не может свидетельствовать ни об исчезновении пространства и времени в микромире, ни о связанной с ним необходимости отказаться в теории от понятий пространства и времени» [84, с. 109].

Тот факт, что для описания экспериментальных данных часто можно обойтись без какого-либо упоминания о координатах x и t , сам по себе еще не доказывает ненаблюдаемого «нефизического» характера этих переменных. В этих случаях мы просто заранее отказываемся от рассмотрения тех аспектов явлений, которые связаны с x и t . В принципе, таким же образом можно было бы отказаться и от рассмотрения вектора импульса p , описывая эксперимент, например, на языке переменных энергии и момента количества движения, которые также являются полным квантово-механическим набором. Различные квантово-механические представления (конфигурационное, импульсное и т. д.), будучи формально эквивалентными в смысле полноты описания, дают разные «резы» изучаемого объекта и тем самым дополняют друг друга.

Кроме рассмотренных выше основных и наиболее часто обсуждаемых аргументов, различными авторами высказывался еще ряд других, более второстепенных соображений в пользу макроскопической природы пространства и времени. Многие из них основаны на недостаточно корректной трактовке известных экспериментальных данных. Например, В. П. Лебедев и В. С. Степин пишут о существовании «самого краткого по времени» процесса, связанного с сильными взаимодействиями, который в этом смысле можно считать «квантом времени» [85, с. 51]; меньшие длительности не имеют физического смысла. Такой процесс, по мнению авторов рассматриваемой статьи, определяется временем жизни самых короткоживущих частиц, резононов, $\tau \sim \hbar/\Gamma$, где Γ — экспериментально измеряемая ширина резонанса (например, ширина пика в спектре эффективных масс или в энергетической зависимости сечения взаимодействия частиц). Поскольку фиксация все более кратких времен τ требует измерения все больших ширин Γ , то при высоких энергиях, когда с большой вероятностью происходит интенсивное образование резононов, резонансные пики перекрываются и, говоря словами авторов статьи [85], «имеются вполне серьезные основания предполагать, что при увеличении энергии взаимодействия на определенном этапе мы уже не сможем фиксировать относительно локализованные образования микромира сколь угодно малой длительности, выйдем на чистый вакуум, где подобные состояния неразличимы <...>». Сказанное означает, что экспериментально-измерительная деятельность не позволяет вычленить в микромире в качестве часов какой-либо субэлементарный процесс <...>. Понятие времени теряет смысл по отношению к субэлементарному слову» [85, с. 52]. Однако в опытах с упругим рассеянием уже сейчас экспериментально достижимы временные интервалы $\Delta t \sim 5 \cdot 10^{-26}$ сек, значительно более краткие, чем времена жизни резононов $\tau \geq 10^{-23}$ сек, поэтому утверждение о существовании «наикратчайшего субэлементарного процесса» просто неверно (см. также примечание на стр. 41).

Трудности традиционных подходов пространственно-временной интерпретации микроявлений — только одна из причин возникнове-

ния гипотезы макроскопического пространства — времени, другая не менее важная причина связана с методологическим требованием, чтобы все входящие в теорию величины были, хотя бы в принципе, наблюдаемы (измеримы). «Гипотезу о макроскопической природе пространства и времени, — подчеркивает в своей монографии [82, с. 88] В. С. Лукьянец, — можно понимать как утверждение о том, что физические понятия пространства и времени (или пространственно-временной континуум) также принадлежат к классу ненаблюдаемых физических понятий»; а раз так, то в целях дальнейшего прогресса мы должны перестать думать и говорить о таком ненаблюдаемом континууме и строить теорию только в терминах действительно измеримых величин [82, с. 1]. Однако независимо от точки зрения на понимаемый указанным образом «принцип наблюдаемости»*, микроскопические пространство и время ни в коем случае нельзя отнести к ненаблюдаемым, т. е. полностью независящим от экспериментального исследования физическим понятиям. Даже при той, во многом весьма несовершенной трактовке субатомных явлений, которой располагает современная теория, пространственно-временные понятия и образы, соответствующие определенным микрообъектам и микроявлениям, однозначно получаются из различных экспериментов, и их изменения взаимооднозначно связаны с изменениями изучаемой объективной реальности.

Нельзя не согласиться с высказыванием М. Э. Омельяновского о том, что «гипотеза о макроскопической природе пространства и времени несостоятельна с философской точки зрения; она не подтверждается результатами философского анализа достижений современной физики» [86, с. 364].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мостепаненко А. М. Проблема универсальности основных свойств пространства и времени. Л., «Наука», 1969.
2. Риман Б. О гипотезах, лежащих в основаниях геометрии. — В кн.: Об основаниях геометрии. Пер. с нем. М., Гостехиздат, 1956, с. 309.
3. Давыдов А. С. Квантовая механика. М., Физматгиз, 1963.
4. Evidence for a primary cosmic-ray particle with energy $4 \cdot 10^{21}$ eV. — «Phys. Rev. Lett.», 1971, v. 27, p. 1604. Auth.: K. Suga, e. a.
5. Березинский В. С., Засепин Г. Т. О происхождении космических лучей сверхвысоких энергий. — «Ядерная физика», 1971, т. 13, с. 797.
6. Локк Д. Избранные философские произведения. В 2-х томах. Т. 1. М., Сол-эгиз, 1960.
7. Гейзенберг В., Шредингер Э., Дирак П. Современная квантовая механика. Пер. с нем., М., Гостехиздат, 1934.

* Возможна и более общая формулировка этого принципа: в теорию могут входить любые величины, сведения о которых можно получить как путем непосредственных измерений, так и любым косвенным образом, на основе измерения других величин; другими словами — все величины, измерения которых скоррелированы с какими-то изменениями в окружающем нас мире.

О таких скрытых от непосредственного наблюдения величинах — случайных траекториях — идет речь, например, в работах А. А. Тяпкина (см. § 2).

8. Гейзенберг В. Физика и философия. Пер. с нем. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
9. Тяпкин А. А. Дополнение к кн.: Клайн Б. В поисках физики и квантовая теория. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1971.
10. Андреев Э. П. Пространство микромира. М., «Наука», 1970.
11. Алексеев И. С. К вопросу об универсальности категорий пространства и времени. — В кн.: Философские вопросы современной физики. М., «Знание», 1969.
12. Алексеев И. С. Пространство, время, структура. — В кн.: Философия и физика. Воронеж, ВГУ, 1972.
13. Barashenkov V. S., Kaiser H. J. Electric and magnetic polarizabilities of nucleons and pions. — «Fortschritte der Physik», 1962, Bd 10, S. 33.
14. Барашенков В. С. Современное состояние проблемы структуры элементарных частиц. — В кн.: Философские вопросы квантовой физики. М., «Наука», 1970.
15. Алексеев И. С. К вопросу о правомерности применения понятий пространства и времени в физике микромира. — В кн.: Пространство и время в современной физике. Киев, «Наукова думка», 1968.
16. Блохинцев Д. И. Принципиальные вопросы квантовой механики. М., «Наука», 1966.
17. Вяльцев А. Н. Дискретное пространство — время. М., «Наука», 1965.
18. Бом Д. Кvantовая теория. Пер. с англ., М., Физматгиз, 1961.
19. Свидерский В. И. Философское значение пространственно-временных представлений в физике. Л., ЛГУ, 1956.
20. Тяпкин А. А. О возможности дальнейшего развития совместного координатно-импульсного представления квантовой механики. — В кн.: Философские проблемы физики элементарных частиц. М., Изд-во АН СССР, 1963.
21. Тяпкин А. А. К развитию статистической интерпретации квантовой механики на основе совместного координатно-импульсного представления. — В кн.: Философские вопросы квантовой физики. М., «Наука», 1970.
22. Фон Нейман И. Математические основы квантовой механики. Пер. с англ. М., «Наука», 1964.
23. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. М., «Высшая школа», 1963.
24. Фейима Р., Хибс А. Кvantовая механика и интегралы по траекториям. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
25. Frequency of the hydrogen maser. — «Nature», 1971, v. 229, p. 110. Auth.: L. Essen e. a.
26. Brodsky S. J. Radiative problems and quantum electrodynamics. Report SLAC-PUB-989. Stanford, 1971.
27. Бродский С. И., Дрэлл С. Д. Современный статус квантовой электродинамики. — Успехи физ. наук, 1972, т. 107, с. 57.
28. Wesley J. C., Rich A. Preliminary results of a new electron g-2 measurement. — «Phys. Rev. Lett.», 1970, v. 24, p. 1320.
29. Measurement of the muonium hfs splitting and of the muon moment by «double resonance» and a new value of a . — «Phys. Rev. Lett.», 1970, v. 25, p. 1779. Auth.: R. De Voe e. a.
30. Ericson G. W. Improved Lamb shift calculation for all values of Z . Report CERN, Гeneva, 1971.
31. Берштейн Дж., Файнберг Г., Ли Т. Д. Возможная C -, T -нинвариантность в квантовом взаимодействии. — В кн.: Вопросы физики элементарных частиц. Пер. с англ. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1966.
32. Golub R., Pendlebury J. M. The electric dipole moment of the neutron. — «Contemporary. Phys.», 1972, v. 13, p. 519.
33. Ramsey N. F. The electric and magnetic dipole moments of the neutron. — In: Proc. of the IUPAP conf. «Neutrino 75». Budapest, 1976, p. 307.
34. Barshay S. Proposal to test time-reversal invariance in the reaction $n+p \rightleftharpoons d+\gamma$. — «Phys. Rev. Lett.», v. 17, p. 49.
35. Experimental test of time-reversal invariance in the reaction $n+p \rightleftharpoons d+\gamma$. — «Phys. Rev. Lett.», 1971, v. 26, p. 1659. Auth.: B. L. Schrock e. a.

36. New results on $n+p \rightleftharpoons d + \gamma$ and time-reversal invariance. — «Phys. Rev. Lett.», 1971, v. 27, p. 881. Auth.: D. F. Bartlett e. a.
37. Николаев Н. Н. Нарушение CP -инвариантности. — В кн.: Материалы 1-й школы по физике ИТЭФ. Вып. 3. М., Атомиздат, 1973, с. 30.
38. Kinstner O. C. Test for time-reversal invariance of the electromagnetic interaction using the Mössbauer effect in Ru^{99} . — «Phys. Rev. Lett.», 1967, v. 19, p. 872.
39. Newton T. D., Wigner E. P. Localized states for elementary particle systems. — «Rev. Mod. Phys.», 1949, v. 21, p. 400.
40. Полубаринов И. В. Об операторе координаты в квантовой теории поля. Сообщение ОИЯИ Р2-8371, Дубна, 1974.
41. Блохинцев Д. И. О локализации релятивистских микрочастиц в пространстве и времени. Сообщение ОИЯИ Р-2631, Дубна, 1966.
42. Блохинцев Д. И. Пространство и время в микромире. М., «Наука», 1970.
43. Барашенков В. С. Актуальные философские проблемы в физике элементарных частиц. — «Вопросы философии», 1965, № 9, с. 84.
44. Барашенков В. С., Блохинцев Д. И. Ленинская идея неисчерпаемости материи в современной физике. — В кн.: В. И. Ленин и современное естествознание. М., «Мысль», 1969.
45. Барашенков В. С. Сечение взаимодействия элементарных частиц. М., «Наука», 1966.
46. Коккеде Я. Теория кварков. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
47. Свидерский В. И. Пространство и время. М., Госполитиздат, 1958.
48. Свидерский В. И. Некоторые вопросы диалектики изменения и развития. М., «Мысль», 1965.
49. Кузнецов Б. Г. Принцип относительности в античной, классической и квантовой физике. М., Изд-во АН СССР, 1959.
50. Chew G. F. What is nucleon? — In: Proc. of the intern. conf. on nucleon structure at Stanford University. Stanford, 1963.
51. A search for time-parity violation in the beta-decay of polarized neutrons. — «Phys. Lett. B», 1968, v. 27, p. 557, Auth.: B. G. Erozolimsky e. a.
52. Test of time-reversal invariance and measurements of position and neutrino asymmetries in polarized Ne^{19} beta-decay. — «Phys. Rev.», 1969, v. 184, p. 1117. Auth.: F. P. Calaprice e. a.
53. The phase Φ_{+-} of CP -violation in the $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decay. — «Phys. Lett.», 1974, v. 52, p. 119. Auth.: S. Gjesdal e. a.
54. Чувилов И. В. Распады π -мезонов и K -мезонов с участием лептонов. — В кн.: Материалы 3-й школы физики ИТЭФ. Вып. 3. М., Атомиздат, 1975, с. 45.
55. Winter K. Weak interactions and CP -violation. — In: Proc of the 1972 intern. school of subnuclear physics. Bologna, Editore compositori Bologna, 1973, p. 469.
56. Weinberg S. Gauge theory of CP -nonconservation. — «Phys. Rev. Lett.», 1976, v. 37, p. 657.
57. Sikivie P. Gauge theoretical realization of the superweak model of CP -violation. — «Phys. Lett. B», 1976, v. 65, p. 141.
58. McKay D. W. Comments on spontaneous CP -violating in a gauge model with spontaneous P -violation. — «Phys. Rev. D», 1977, v. 15, p. 905.
59. Wolfenstein L. Violation of CP -invariance and the possibility of very weak interactions. — «Phys. Rev. Lett.», 1964, v. 13, p. 562.
60. McKellar P. T -violation in nuclear physics. — In: Proc. of the 3d-intern. conf. on high energy physics and nuclear structure. Columbia University, 1969, p. 682.
61. Richter A. Present status of time-reversal invariance. — In: Proc. of the Banff summer school on intermediate energy nuclear physics. Edmonton (Canada), 1970, p. 343.
62. Test of time-reversal invariance in the reaction $^{16}\text{O} (d, a)$ and its inverse. — «Phys. Rev. Lett.», 1968, v. 21, p. 447. Auth.: S. T. Thornton e. a.

63. Test of time-reversal invariance in the reactions $Mg^{24} + d \rightleftharpoons Mg^{25} + p$. — «Phys. Rev.», 1968, v. 165, p. 1233. Auth.: W. G. Weikamp e. a.
64. Polarization-Asymmetry test of time-reversal invariance. — «Phys. Rev. Lett.», 1968, v. 21, p. 1467. Auth.: E. E. Gross e. a.
65. Test of charge-conjugation invariance in $p - \bar{p}$ annihilations at rest. — «Phys. Rev. Lett.», 1965, v. 15, p. 591. Auth.: G. Baltay e. a.
66. Test of CP - and C -invariances in $p - \bar{p}$ annihilations at $1,2 \text{ Gev}/c$, involving strange particles. — «Phys. Lett.», 1966, v. 22, p. 105. Auth.: L. Dobrzynski e. a.
67. Готт В. С., Перетурий А. Ф. Методические вопросы изучения виртуальных процессов. — В кн.: Симметрия, инвариантность, структура. М., «Высшая школа», 1967.
68. Компанеец А. С. Может ли окончиться физика как наука? М., «Знание», 1967.
69. Берестецкий В. Б. Калибровочные симметрии и единая теория слабого и электромагнитного взаимодействий. — В кн.: Материалы 1-й школы по физике ИТЭФ. Вып. 1. М., Атомиздат, 1973, с. 3.
70. Pati J. C., Salam A. Lepton number as the fourth «color». — «Phys. Rev. D», 1974, v. 10, p. 275.
71. Pati J. C., Salam A. Quarks, leptons and pre-quarks. — Intern. Conter for theor. physics report IC/75/106. Trieste, 1975.
72. Мельюхин С. Т. К философской оценке современных представлений о свойствах пространства и времени в микромире. — В кн.: Философские проблемы в физике элементарных частиц. М., Изд-во АН СССР, 1963.
73. Zimmerman E. J. The macroscopic nature of space-time, — «Amer. J. of Phys.», 1962, v. 30, N 2, p. 97.
74. Эддингтон А. Относительность и кванты. Пер. с англ. М.—Л., Гостехиздат, 1933.
75. Eddington A. S. Relativity theory of protons and electrons. New York, Cambridge University Press, 1936.
76. Eddington A. S. Fundamental theory. New York, Cambridge University Press, 1946.
77. Van Dantzig D. On the relation between geometry and physics and the concept of space-time. — «Helv. phys. acta. Supplemento», 1956, v. 4, p. 48.
78. Wigner E. Relativistic invariance of quantum-mechanical equations. — «Helv. phys. acta. Supplemento», 1956, v. 4, p. 30.
79. Chew G. F. The dubious role of the space-time continuum in subatomic physics Report UCRL-10891. Berkly, 1963; «Sci. Progress», 1963, v. 51, p. 529.
80. Дышлевой П. С., Лукьянц В. С. Проблема статуса пространственно-временных концепций в теоретической физике. — «Вопросы философии», 1969, т. 10, с. 25.
81. Дышлевой П. С., Лукьянц В. С. При каких условиях гипотеза о макроскопической природе пространства и времени имеет смысл? — В кн.: Пространство и время в современной физике. Киев, «Наукова думка», 1968.
82. Лукьянц В. С. Физико-математические пространства и реальность. Киев, «Наукова думка», 1971.
83. Барашенков В. С., Охлопкова В. А. Сечения пион-нуклонных взаимодействий. Сообщение ОИЯИ Р2-5924, Дубна, 1971.
84. Аронов Р. А. Могут ли пространство и время разделить судьбу теплорода и флогистона? — В кн.: Физическая теория и реальность. Воронеж, ВГУ, 1976.
85. Лебедев В. П., Степин В. С. Гносеологический аспект понятия времени. — «Вопросы философии», 1969, № 10, с. 49.
86. Омельяновский М. Э. Послесловие к кн.: Рейхенбах Г. Направление времени. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.

ПРИЧИННЫЕ СВЯЗИ МИКРОЯВЛЕНИЙ

Причинность представляет собой не только одну из важнейших философских категорий, отражающих глубинные свойства процессов развития в окружающем мире, но и одно из основных понятий современной квантовой физики. Подтверждаемый всей человеческой практикой вывод о том, что все события в природе причинно обусловлены, сформулированный в виде *принципа причинности*, входит в систему аксиом теории поля и элементарных частиц и существенно ограничивает класс допустимых теорий. Конкретные формулировки этого принципа непосредственно сказываются на аппарате теории.

Изучение различных форм причинной связи микроявлений (или, как принято говорить в физике, анализ возможных формулировок принципа причинности) является сейчас предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований. Принцип причинности,— по крайней мере, в его современных формулировках — тесно связан с самыми фундаментальными свойствами пространственно-временных отношений в микромире: локализацией взаимодействий, существованием максимальной скорости передачи этих взаимодействий, возможными нелинейными эффектами и т. д. Обнаружение на опыте отклонений от принятых сейчас формулировок причинности указывало бы на какие-то существенно новые свойства явлений, а может быть и самого пространства — времени в области ультрамалых масштабов Δx и Δt .

Исследование различных форм причинности привлекает особое внимание физиков еще и потому, что современная теория поля содержит ряд не устранимых до сих пор противоречий (стоит лишь вспомнить о бесконечно больших теоретических значениях массы, агнитного момента частиц и других измеряемых на опыте конечных величин), а физика элементарных частиц все более приобретает характер быстро разрастающейся совокупности огромного числа эмпирических фактов, в которых мы рискуем заблудиться. Для устранения противоречий теории и приведения в систему поистине необозримого экспериментального материала нам явно недостает каких-то очень важных закономерностей. Пока даже не ясно, в чем причина этих трудностей: может быть, неверны сами основания теории и, в первую очередь, используемая формулиров-

ка причинности, являющаяся, как уже отмечалось, одним из краеугольных камней современной квантовой теории?

Существует довольно широко распространенное мнение, что изменение этой формулировки представляет собой более простую задачу, чем модернизация других принципов и постулатов. Это мнение в значительной степени основано на историческом опыте, который свидетельствует, что условие причинности — одно из тех немногих общих положений, которые, оставаясь неизменными в своей основе, существенно изменились на протяжении последних ста лет. За это время «каузальный (причинный) абсолютизм классической механики сменился релятивистским детерминизмом теории относительности, который в дальнейшем был дополнен вероятностной картиной уравнения Шредингера и обобщен в середине 40-х годов в единой релятивистской и квантовой формулировке теории поля.

Убеждение в том, что по мере перехода ко все более детальному исследованию микроявлений причинность и далее должна изменять свою форму, обосновывается еще и тем методологическим соображением, что каждому материальному уровню, каждой новой форме движения соответствуют свои специфические закономерности взаимосвязи явлений.

Вместе с тем следует иметь в виду, что несмотря на свой фундаментальный характер «каузальность, обычно нами понимаемая (подчеркнуто мною — В. Б.), есть лишь малая частичка всемирной связи» [1, с. 144] и в этом смысле ее не следует переоценивать. «<...> человеческое понятие причины и следствия, — подчеркивал В. И. Ленин, — всегда несколько упрощает объективную связь явлений природы, лишь приблизительно отражая ее, искусственно изолируя те или иные стороны одного единого мирового процесса» [2, с. 160]. В области ультрамалых масштабов Δx и Δt нам могут встретиться такие формы взаимосвязи явлений, которые будут значительно более общими и универсальными, чем простая причинность, основанная на временной последовательности причины и следствия. Для описания таких взаимосвязей, возможно, потребуются более общие понятия; однако сама идея о том, что в природе не может быть самопроизвольных, ничем не обусловленных и ни с чем не связанных явлений, представляется такой же общей, как и утверждение о материальности окружающего нас мира.

Остановимся прежде всего на самых общих философских определениях категорий причинности, на ее связи с категориями пространства и времени (в частности, коснемся очень важного для современной физики вопроса — можно ли определить причинность независимо от времени). Затем кратко рассмотрим эволюцию причинно-следственных связей при переходе от механики Ньютона к классической теории поля и далее — к квантовой физике.

Ряд важных заключений о том, к чему приводят различные изменения и обобщения известных формулировок принципа при-

чинности, можно получить чисто теоретически — путем анализа различных моделей (см. об этом гл. 4), однако конечным судьей является, конечно, опыт, поэтому особое внимание в книге уделено вопросам экспериментальной проверки различных формулировок принципа причинности.

Конец главы посвящен тесно связанной с причинностью фундаментальной проблеме необратимости времени, которая приобретает сейчас особый интерес в связи с открытием нарушения T -инвариантности и поисками в природе частиц, движущихся со сверхсветовыми скоростями.

Понятно, что рассматриваемый круг вопросов далеко не исчерпывает всей проблемы причинности. С другими аспектами этой проблемы можно познакомиться, прочитав монографии [3—7].

§ 7. Причинность и ее связь с пространством и временем

По-видимому, наиболее общее известное сейчас определение причинности заключается в признании генетической связи явлений, когда одно из них (причина) вызывает, порождает другое (его следствие). Именно наличие такой глубокой, внутренней генетической связи, посредством которой реализуется процесс развития, и вычленяет причинность из неисчерпаемо богатого многообразия различных связей, осуществляющихся в природе: «причина есть причина лишь постольку, поскольку она порождает некоторое следствие» [8, с. 677]. В частности, генетическая связь явлений в целях причинения отличает их от других типов детерминизма, представляющего собой значительно более широкую категорию, чем причинность*.

Совершенно неудовлетворительно используемое иногда определение причинности, когда одно событие объявляется причиной другого, если первое из них всегда сопутствует второму. При этом не учитывают то обстоятельство, что причина не только сопутствует следствию, но и порождает его. Поэтому сопровождающие друг друга события вовсе не обязательно оказываются причинно-связанными; например, они могут порождаться некой общей причиной, но не иметь непосредственной связи между собой. При таком определении причинность фактически рассматривается не как органическое свойство движения материи, а как некоторая логическая категория, устанавливающая связь между нашими знаниями о двух событиях (подобной точки зрения на причинность придерживался, в частности, Рассел [9]).

Вычленяя причинно-следственные соотношения из бесчисленного числа других типов связей, важно иметь в виду, что причи-

* Например, если известно, как координаты одной из двух невзаимодействующих между собой частиц выражаются через координаты другой частицы $[x_2 = f(x_1)]$, то задание положения последней полностью определяет конфигурацию системы. Однако никакой причинной связи здесь нет.

нение всегда вызвано физическим воздействием одного явления на другое, когда между явлениями происходит перенос материи и движения. Именно благодаря этому переносу и осуществляется воздействие причины на следствие. Вместе с тем необходимо также учитывать, что хотя при определении причинности мы и говорим о воздействии одного явления на другое, в действительности, *в основе* причинной связи всегда лежит процесс взаимодействия, которое не только порождает явление-следствие, но и изменяет явление-причину*. Конечно, причинение, как таковое, не сводится к простому взаимодействию двух явлений: характернейшая черта причинно-следственной связи — становление одного из двух связанных явлений, тогда как при взаимодействии соотносятся друг с другом непосредственно данные, уже существующие явления; сам факт существования любого из них не зависит от факта существования другого, не обусловлен им [10, с. 9].

Нетрудно видеть, что в приведенной в начале параграфа формулировке причинности существенным образом использована категория времени. Более того, применяемые для определения причинности термины «вызывает», «порождает» не только неразрывно связаны с понятием времени, но и предполагают такое весьма специальное свойство его структуры, как безусловную возможность однозначного упорядочения двух временных точек: «вызывать», «порождать» можно лишь то, чего сначала не было (хотя бы частично) и что потом стало — тем самым определяется временная последовательность**.

Органическая связь всех известных сейчас определений причинности с категорией времени отмечалась многими исследователями. «Мы все прекрасно сознаем наличие тесной связи между последовательностью времени и причинными процессами», — подчеркивает Уитроу в своей известной монографии [11, с. 347]. Многие авторы считают наличие такой связи не только само собой разумеющимся, но и рассматривают ее как один из наиболее важных ингредиентов понятия причинности. Так, по мнению Я. Ф. Аскина, «Время органически связано с причинностью. Именно причинность как генетическое отношение, реализуемое в процессе воздействия одного явления на другое, занимающем определенный интервал времени, необходимо включает в себя одностороннюю временную ориентированность от причины

* В некоторых случаях может показаться, что причинная связь имеет вид явно одностороннего воздействия одного явления на другое. Это имеет место, когда явления разделены целой серией промежуточных событий. Например, если нажатие на курок винтовки рассматривать как причину падения мишени, то последнее не оказывает никакого влияния на свою причину. Дело здесь в том, что фактической причиной падения мишени является удар ее пулей, когда, действительно, происходит обмен взаимодействием; нажатие на курок выступает при этом всего лишь как *условие* действия причины. Рассмотрение процесса передачи взаимодействия позволяет установить действительную причину явления.

** Что, конечно, не исключает возможности частично одновременного существования причины и следствия. Это — совсем другой вопрос [6, с. 136].

к следствию, от предшествующего к последующему» [12, с. 131]; «связь понятия причинного порождения с понятием предшествования во времени определяет само положение причинности в качестве одного из краеугольных камней материалистического мировоззрения» [13, с. 19]. Я. Ф. Аскин предостерегает против «неправомерного расширительного толкования причинности, при котором выпадает идея о временной последовательности причины и следствия, столь существенная для причинности» [13, с. 20]. «Существуют разные соотношения между причиной и следствием во времени в зависимости от вида причинных связей», — отмечает Г. А. Свечников [6, с. 143], однако *всякое* изменение системы взаимодействующих объектов является по его мнению «следствием предшествующего взаимодействия этих объектов».

Наряду с этим в литературе можно найти и противоположную точку зрения. Часть авторов убеждены в том, что причинение является более общей категорией, чем время, во всяком случае, может быть определено независимо от времени. Так, по мнению И. С. Алексеева «причинный тип изменений также может трактоваться без предположения о наличии временного различия между причиной и следствием» [14, с. 166].

Э. М. Чудинов также не исключает того, что «мы могли бы определить причинность без явного использования понятия времени, например, так: причинность состоит в воздействии одного явления (причины) на другое (следствие)» [15, с. 249]. Однако в причинно-следственных связях всегда имеет место взаимодействие двух явлений, поэтому, если не принимать во внимание характера *изменений* взаимосвязанных явлений, т. е. не учитывать основного элемента причинности — процесса становления нового, то нельзя установить, какое из двух явлений — причина, а какое — следствие.

Возможность «вневременной» формулировки причинности детально обсуждал Рейхенбах, который считал, что о времени вообще нельзя ничего сказать, кроме того, как указать на причинный порядок событий, который и выражает собой его реальное содержание (его «топологическую координативную дефиницию») [16, с. 138]. Сущность причинности Рейхенбах видит в том, что «если E_1 является причиной E_2 , то тогда небольшое изменение (метка) в E_1 связано с небольшим изменением в E_2 , тогда как небольшое изменение в E_2 не связано с изменением в E_1 » [16, с. 136]. Такое понимание причинности, действительно, не связано с категорией времени, однако при этом опять-таки оказывается утерянным основное качество причинения — неформальная генетическая связь соотносимых событий. Под определение, предлагаемое Рейхенбахом, подходят не только причинно-следственные связи, но и просто сопутствующие друг другу, скоррелированные между собой события E_1 и E_2 . Как совершенно правильно отмечает Э. М. Чудинов, указанная Рейхенбахом зависимость между E_1 и E_2 необходима, но недостаточна для того, чтобы эти события

находились в причинной связи; чтобы условие Рейхенбаха, действительно, характеризовало причинную связь E_1 и E_2 , надо допустить не просто, что изменения E_1 сочетаются с изменениями E_2 , но что изменения E_2 являются результатом изменений E_1 [15, с. 248].

В настоящее время не известно ни одного достаточно удовлетворительного определения причинности, в котором бы не использовалось понятие времени, и большинство ученых, как философов, так и физиков, склоняются к мнению о неразрывной связи этих двух категорий. Тем не менее этот вопрос требует дальнейшего детального изучения и конкретизации. Дело в том, что развитие современной физики происходит в сторону все более общих пространственно-временных структур, в частности, теоретики сейчас серьезно изучают различные нелокальные структуры, в которых понятия «раньше», «позже» имеют лишь относительный смысл, зависящий от выбора системы координат (см. гл. 4). Такие теории не укладываются в рамки обычных формулировок причинности, поэтому следует либо признать возможность акаузальных связей, либо дать более общую формулировку понятию причинности.

Можно, конечно, сказать, что нелокальные и им подобные структуры существуют пока только на бумаге и серьезно говорить об этом следует лишь после того, как они подтверждатся экспериментом. Однако весьма прискорбно, когда роль философии сводят к фиксированию и интерпретации уже достигнутых физических результатов.

В какой степени причинность можно определить независимо от категории времени или, другими словами, насколько можно ослабить связь между понятиями причинности и времени,— этот вопрос следует считать пока не ясным. Для физики элементарных частиц ответ на него имеет первостепенное значение.

Поскольку приведенное выше определение причинности не содержит каких-либо «пространственных элементов», то с первого взгляда может показаться, что причинность не имеет непосредственной связи со свойствами пространства. Однако это далеко не так; в действительности, структура причинно-следственных цепей весьма существенно зависит от топологических свойств пространства, прежде всего от его размерности и связности. В частности, как это отметил еще Рейхенбах [16, с. 63—66], если не допускать акаузальных эффектов, то реальное пространство одной топологии принципиально нельзя описать с помощью пространства другой топологии (см. также монографию [17, с. 33—37]); например, любая попытка описать пространство размерности n с помощью пространства размерности $m \neq n$ сразу же приводит к возникновению причинно необусловленных явлений, поскольку передача взаимодействий в плоскостях дополнительных координатных осей будет восприниматься в пространстве меньшей размерности как акаузальное дальнодействие. В принципе, такая гипотетическая возможность может явиться источником нелокальных микроявленияй.

тов, реализующихся со сверхсветовыми скоростями, и в свою очередь исследоваться в опытах по проверке различных формулировок причинности.

Таким образом, мы видим, что свойства причинности существеннейшим образом связаны со свойствами пространства и времени; экспериментальное изучение особенностей причинных связей может дать важные сведения о самых фундаментальных характеристиках пространственно-временной структуры. Вместе с тем очень важно подчеркнуть, что даже наиболее общее известное сейчас философское определение причинности во многом остается еще весьма несовершенным и, по-видимому, допускает дальнейшие обобщения. Тем более это справедливо по отношению к тем значительно более специальным и частным формулировкам причинности в квантовой механике, теории поля и физике элементарных частиц, к рассмотрению которых мы сейчас и переходим.

§ 8. Формулировка причинности в классической (неквантовой) физике

В классической нерелятивистской механике состояние системы частиц в каждый момент времени t определяется заданием координат и импульсов составляющих ее частиц. Изменение состояния системы с течением времени, ее движение описываются системой уравнений Ньютона

$$m_i d^2 \mathbf{x}_i / dt^2 = \mathbf{F}_i(\mathbf{x}_i), \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

где \mathbf{F}_i — сила, действующая на i -ю частицу. При этом состояние системы в момент t можно полностью определить, если известно ее состояние в любой другой момент t_0 , прошедший ($t_0 < t$) или будущий ($t_0 > t$) по отношению к рассматриваемому моменту времени t .

Требование, чтобы состояние системы определялось лишь ее прошлым и не зависело от событий в будущем, т. е. условие $t_0 < t$, можно рассматривать как формулировку причинности в нерелятивистской классической механике.

«Жесткий» тип детерминизма, когда состояние системы в момент t_0 однозначно определяет все ее будущее поведение, принято называть классическим, или лапласовским, детерминизмом. Этот тип детерминизма часто отождествляют с причинно-следственной связью. Подобный взгляд следует точке зрения самого Лапласа, который считал, что настояще состояние любой системы (в том числе и всей бесконечной Вселенной) есть следствие ее предыдущего состояния и причина последующего [18, с. 9].*

* Лаплас следующим образом сформулировал свое представление о развитии мира: «Ум, которому были бы известны для какого-либо данного момента все силы, одушевляющие природу, и относительное положение всех ее составных частей, <...> обнял бы в одной формуле движения величайших тел вселен-

Г. А. Свечников был, по-видимому, первым, кто обратил внимание на то, что отождествление лапласовского детерминизма с причинно-следственной связью, когда состояние системы в момент времени t_0 рассматривается как причина, а ее состояние в последующий момент t как следствие, является неточным, так как при этом игнорируется активный, динамический аспект причинной связи и, кроме того, отсутствует такой ее важный признак, как наличие двух объектов — носителей причинной связи [6, 19] *. Тем не менее иногда можно слышать, что задание определенного состояния системы, т. е. скоростей всех входящих в нее частиц и расстояний между ними, полностью определяет также и силы, действующие на систему, и в этом смысле можно утверждать, что состояние системы в момент времени t_0 является причиной ее последующих состояний при $t > t_0$, а понимаемый в таком смысле лапласовский детерминизм фактически совпадает с причинной связью. Однако с подобной точкой зрения нельзя согласиться, поскольку сигнал от одной частицы к другой передается с запаздыванием и при $t = \text{const}$ частицы не взаимодействуют между собой (если только не рассматривать гипотетические частицы, имеющие сверхсветовую скорость), поэтому задание конфигурации системы в фиксированный момент времени никоим образом не определяет действующих на нее сил. Эти силы должны быть заданы дополнительно или же определены путем сопоставления состояний системы при *нескольких* значениях t .

Знание причинной связи *объясняет* явление, в то время как лапласовский детерминизм только *описывает* изменение этого явления, связь его состояний **.

Лапласовский детерминизм нерелятивистской теории не исключает существования дальнодействующих сил; мгновенные передачи сигналов в этой теории не считаются акаузальными эффектами. Устранение дальнодействия связано с переходом к реляти-

ной наравне с движением мельчайших атомов» [18, с. 9]. При этом статистические, вероятностные закономерности Лаплас рассматривал лишь как временные, являющиеся следствием нашего неполного знания законов природы. «Все явления, — писал он, — даже те, которые по своей незначительности как будто не зависят от великих законов природы, суть следствия этих законов, столь же неизбежные, как обращение Солнца. Не зная уз, соединяющих их с системой мира в ее целом, их приписывают конечным причинам или случаю, в зависимости от того, происходили ли и следовали ли они одно за другим с известной правильностью или же без видимого порядка; но эти мнимые причины отбрасывались по мере того, как расширялись границы нашего знания, и совершенно исчезали перед здравой философией, которая видит в них лишь проявление небедения» [18, с. 8].

* Можно сказать, что причинная связь соотносит различные объекты, а связь состояний — различные состояния одного и того же объекта. Подробнее о соотношении категорий причинности и связи состояний см. в монографии [6].

** Напомним, что сила $\mathcal{F} \sim d^2x/dt^2 = dv/dt = [v(t') - v(t)]/(t' - t)$, где $t' = t + dt$.

вистской теории. Уравнения движения частиц и связанного с ними поля записутся тогда в виде

$$\left. \begin{aligned} m_i \frac{du_{i\alpha}}{ds_i} &= u_{i\beta} \mathcal{F}^{\alpha\beta}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ \frac{\partial^2 A_\alpha}{\partial x_\beta \partial x^\beta} &= \sum_{i=1}^n e_i u_{i\alpha}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где $u_{i\alpha}^{\text{ко}} = dx_{i\alpha}/ds_i$ — компонента релятивистской четырехмерной скорости i -й частицы с зарядом e_i ; $ds_i = dt \sqrt{c^2 - v_i^2}$ — дифференциал ее собственного времени; $v_i = dx_i/dt$ — ее трехмерная скорость;

$$\mathcal{F}^{\alpha\beta} = \partial A^\alpha / \partial x^\beta - \partial A^\beta / \partial x_\alpha$$

— тензор электромагнитного поля (для простоты рассматриваем случай, когда все силы имеют электромагнитное происхождение). Суммирование по повторяющимся греческим индексам выполняется от 1 до 4.

Решение системы уравнений (13), так же как и решение уравнений (12), полностью определяется заданием состояния системы частиц и поля в некоторый момент времени t_0 . Требование, чтобы состояния системы зависели лишь от ее предыдущей истории, и заложенное в основание релятивистской теории условие, чтобы скорости сигналов не превосходили скорости света ($v \leq c$), являются новой формулировкой причинности. Как и в нерелятивистской механике, мы встречаемся здесь с «жестким» лапласовским детерминизмом.

Важно подчеркнуть, что условие $v \leq c$ накладывает значительно большие ограничения на свойства физической системы, чем требование формальной релятивистской инвариантности, которое не исключает, например, в правых частях уравнений (13) члены типа

$$\left. \begin{aligned} u_{i\beta} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{F}^{\alpha\beta}(x) G_1(x - x_i) d^4 x; \\ \sum_{i=1}^n e_i \int_{-\infty}^{+\infty} u_{i\alpha} G_2(x - x_i) ds_i \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(G_i — релятивистски-инвариантные «размазывающие» функции), описывающие нелокальные взаимодействия со сверхсветовыми скоростями передачи сигналов (из точки x в точку x_i , где расположен «центр» частицы). Состояние системы в момент t в этом случае однозначно не определяет ее состояния в момент $t + \Delta t$ [20].

Последовательно релятивистски-инвариантное описание, автоматически исключающее системы со сверхсветовыми скоростями сигналов, можно получить, если в уравнениях (13) отказаться от

выделенной роли общей временной переменной и для каждой частицы, а также для поля ввести свое собственное время [21]. Тогда

$$\left. \begin{aligned} m_i \frac{du_{i\alpha}}{ds_i} &= e_i \delta_{ij} u_{i\beta} \mathcal{F}^{\alpha\beta}(x_i) - e_i e_j \mathcal{D}(x_i - x_j); \\ \frac{dA_\alpha(x)}{ds_j} &= e_j u_{j\alpha} \mathcal{D}(x - x_j); \\ \frac{\partial^2 A_\alpha(x)}{\partial x_\beta \partial x^\beta} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где x_i и x — четырехмерные пространственно-временные координаты i -й частицы и поля; $ds := dt \sqrt{c^2 - v^2}$;

$$\mathcal{D}(x) = \frac{1}{4c} \frac{t}{|t|} \frac{\delta(ct - r) + \delta(ct + r)}{r} \quad (16)$$

— релятивистско-инвариантная \mathcal{D} -функция, обращающаяся в нуль во всех пространственно-подобных точках $r = |\mathbf{x}| > c|t|$.

\mathcal{D} -функции в правых частях уравнений (15) отражают тот факт, что на электромагнитное поле в точке x влияют лишь те частицы, которые удалены от этой точки на расстояния $\Delta x \leq \Delta t/c$; взаимодействие между частицами также возможно лишь при условии, что они разделены интервалами $\Delta x \leq \Delta t/c$. Во всех этих случаях скорость передачи сигнала $v = \Delta x / \Delta t \leq c$ (рис. 6). В противном случае правые части уравнений (15) обращаются в нуль (значение δ_{ij} также равно нулю, если $i \neq j$).

Нетрудно видеть, что для совместимости системы уравнений (15) необходимо, чтобы результат дифференцирования по временным переменным s_i и s_j не зависел от того, в каком порядке это дифференцирование выполняется:

$$\frac{d^2 u_{i\alpha}}{ds_i ds_j} = \frac{d^2 u_{i\alpha}}{ds_j ds_i}; \quad \frac{d^2 A_\alpha(x)}{ds_i ds_j} = \frac{d^2 A_\alpha(x)}{ds_j ds_i}. \quad (17)$$

Эти соотношения являются условиями интегрируемости системы уравнений (15) и, как легко убедиться непосредственным вычислением, разность их левых и правых частей пропорциональна функции $\mathcal{D}(x_i - x_j)$; поэтому в силу свойств $\mathcal{D}(x)$ условия (17) будут выполнены лишь для пространственно-подобных конфигураций $|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| > c|t_i - t_j|$. Наоборот, если хотя бы одна пара частиц расположена так, что пространственный интервал $|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| < c|t_i - t_j|$, то уравнения движения (15) оказываются несовместными.

С физической точки зрения выполнение условий (17) означает, что состояние системы должно задаваться таким образом, чтобы состояния отдельных частиц не зависели одно от другого; други-

ми словами, состояние системы должно задаваться пространственной конфигурацией, в которой частицы не взаимодействуют между собой (рис. 7). Состояние поля $A_\alpha(x)$ также следует определять на пространственно-подобной поверхности σ , две любые точки которой удовлетворяют неравенству $|x' - x''| > c|t' - t''|$ *.

Можно ввести еще более общую так называемую сверхмного-временную формулировку уравнений движения, приписав каждой

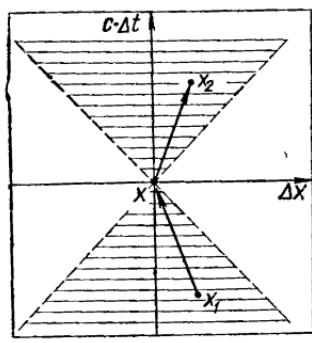


Рис. 6. В заштрихованной (времяподобной) области $\Delta x < c\Delta t$, в остальной (пространственно-подобной) области $\Delta x > c\Delta t$. В релятивистско-инвариантной теории могут взаимодействовать лишь те объекты, которые расположены во времяподобных областях относительно друг друга (точки $x_1 - x$, $x - x_2$ и т. п.)

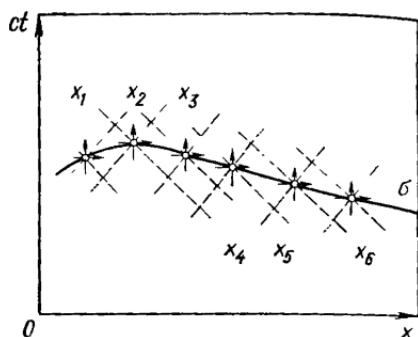


Рис. 7. Точки x_i , определяющие конфигурацию состояния системы частиц, располагаются на пространственно-подобной поверхности σ . Каждая из точек x_i лежит вне световых конусов всех других точек

пространственной точке x , в которой определяется поле A_α , свое собственное время t_x . Для этого заметим, что поле в точке x полностью определяется заданием значений поля и его нормальной производной в точках некоторой пространственно-подобной поверхности σ :

$$A_\alpha(x) = \int_{\sigma} \left[\mathcal{D}(x - x') \frac{\partial A_\alpha(x')}{\partial x'_\beta} - A_\alpha(x') \frac{\partial \mathcal{D}(x - x')}{\partial x'_\beta} \right] d\sigma'_\beta \quad (18)$$

(это можно рассматривать как математическое выражение известного принципа Гюйгенса). Определенное, таким образом, поле A_α представляет собой функционал поверхности σ , и его можно обоз-

* В частном случае, когда все частицы и поле характеризуются одной временной переменной, эти условия выполняются автоматически, поскольку плоскость $t_1 = t_2 = \dots = t_n = t$ является пространственно-подобной.

значить $A_\alpha[x, \sigma]$. Если теперь ввести функциональную производную

$$\frac{\delta A[x, \sigma]}{\delta \sigma(x')} = \lim_{\Delta \Omega \rightarrow 0} \frac{A[x, \sigma'] - A[x, \sigma]}{\Delta \Omega}, \quad (19)$$

где $\Delta \Omega$ — объем, заключенный между гиперповерхностями σ и σ' , которые различаются лишь в окрестности точки x' (рис. 8), то

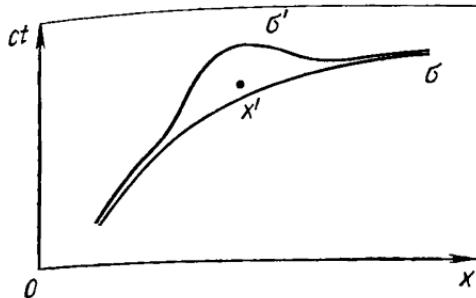


Рис. 8. Пространственно-подобные поверхности σ и σ' различаются в точке x' , заключенным между ними объемом $\Delta \Omega$

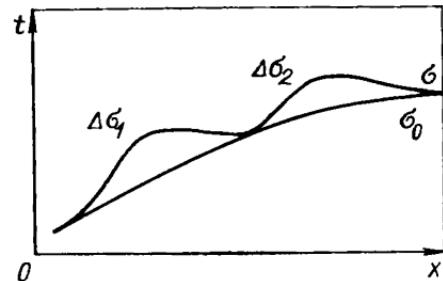


Рис. 9. Гиперповерхность σ отличается от σ_0 «горбами» $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_2$. Символически $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2$

многовременная система уравнений (15) дополнится уравнением

$$\frac{\delta A_\alpha[x, \sigma]}{\delta \sigma(x')} = c \sum_i e_i u_{i\alpha} \mathcal{D}(x - x') \quad (20)$$

и еще одним условием интегрируемости

$$\frac{\delta^2 A_\alpha[x, \sigma]}{\delta \sigma(x') \delta \sigma(x'')} = \frac{\delta^2 A_\alpha[x, \sigma]}{\delta \sigma(x'') \delta \sigma(x')}, \quad (21)$$

которое выполняется лишь для пространственно-подобных интервалов $|x' - x''| > c|t' - t''|$.

Нетрудно убедиться, что условия (17) и (21) автоматически исключают нелокальные члены (14), соответствующие акаузальным эффектам [20]. Разности правых и левых частей соотношений (17) и (21) в этом случае оказываются пропорциональными не \mathcal{D} -функциям, как это имеет место для локальных взаимодействий, а интегральным выражениям, которые отличны от нуля не только для времязадобных, но и для пространственно-подобных интервалов $|x_i - x_j| > c|t_i - t_j|$.

Можно также показать, что состояние системы, заданное на поверхности σ_0 , однозначно определяет состояние этой системы на поверхности σ , независимо от выбора порядка промежуточных поверхностей (рис. 9) (состояние на поверхности σ можно определить путем последовательных переходов $\sigma \rightarrow \sigma_0 + \Delta\sigma_1 \rightarrow \sigma$ или $\sigma_0 \rightarrow \sigma_0 + \Delta\sigma_2 \rightarrow \sigma$, различающихся выбором промежуточной поверх-

ности; если выполнены условия (15) и (21), то результат в обоих случаях одинаков) только тогда, когда выполняются равенства (17) и (21). Во всех других случаях лапласовский детерминизм оказывается нарушенным.

Однако самих по себе условий интегрируемости (17), (21) еще недостаточно для того, чтобы обеспечить выполнение принципа причинности. Эти условия, очевидно, должны быть дополнены требованием, чтобы гиперповерхность σ_0 располагалась в прошлом по отношению к поверхности σ (состояние системы определяется ее прошлым, а не будущим). Это приводит к тому, что в решениях уравнений функция $\mathcal{D}(x)$ заменяется так называемой запаздывающей или, как еще иногда говорят, ретардированной функцией

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_{\text{ret}}(x) &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{t}{|t|} \right) \mathcal{D}(x) = \frac{1}{4\pi r} \delta(ct - r) = \\ &= \begin{cases} \mathcal{D}(x), & \text{если } t > 0; \\ 0, & \text{если } t < 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

которая также является релятивистски-инвариантной функцией и автоматически исключает передачу взаимодействий из верхней части светового конуса (см. рис. 6).

Условия интегрируемости (17) и (21), дополненные условием, чтобы состояние системы в рассматриваемый момент времени зависело лишь от ее состояний в прошлом, представляют собой наиболее общую и последовательную формулировку причинности в релятивистской классической физике. При этом не только совокупность событий, но и каждое из них в отдельности совершенно однозначно предсказуемы, если точно известен закон взаимодействия и состояние системы в некоторый исходный момент времени t_0 (или более обще — на некоторой пространственно-подобной гиперповерхности σ_0).

§ 9. Квантово-механическая трактовка причинности

Как известно, состояние системы частиц в квантовой механике описывается волновой функцией $\psi(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$, квадрат модуля которой равен вероятности обнаружить частицы соответственно в точках x_1, x_2, \dots, x_n . При этом, если даже в некоторый момент времени t_0 нам удалось достаточно точно зафиксировать значения координат всех частиц (например, пропуская частицы через отверстия в экране), то в следующий момент $t_0 + \Delta t$ эти координаты, тем не менее, снова оказываются вероятностно распределенными, и дисперсия этого распределения тем заметнее, чем более точно были известны значения координат в момент t_0 . В этом отношении квантовая механика принципиально отличается от классической физики, где достаточно точно значение коорди-

нат частиц в момент времени t_0 позволяет сколь угодно точно определить их значения в последующий момент $t_0 + \Delta t$.

Если вероятностный характер предсказаний классической статистики отнюдь не лежит в самой природе рассматриваемых ею объектов, а связан лишь с тем, что эти предсказания получаются на основании гораздо меньшего количества данных, чем это нужно было бы для полного механического описания, то в современную квантовую механику вероятностный элемент входит органически и неустранимно*.

Тот факт, что при одних и тех же фиксированных значениях координат микрочастицы в исходном состоянии измерение в момент времени $t > t_0$ дает различные положения этой частицы, часто интерпретируют как доказательство нарушения принципа причинности в квантовой механике: одна и та же причина, действующая в начальный момент времени, приводит к различным следствиям, и смена одного следствия другим при переходе к новому эксперименту представляется совершенно необъяснимым, беспричинным явлением**. «Квантовая механика окончательно опровергла закон причинности», — подчеркивал Гейзенберг в своей статье [24]. В более поздней работе [25] он уточняет: «Современная атомная физика отменяет закон причинности и следствия или по крайней мере частично лишает его силы настолько, что невозможно говорить о закономерностях природы в прямом смысле: «Закон причинности, — читаем мы в известной монографии Дирака [26, с. 12]. — может применяться только в системе, которая не подвергается возмущениям. Если система мала, то невозможно наблюдать ее, не производя в ней серьезных возмущений, а следовательно, нельзя ожидать, что между результатами наблюдений будет существовать какая бы то ни было причинная связь. Поэтому в квантовой теории имеет место принципиальный индeterminизм». Подобные выводы стали казаться еще более убедительными после того, как фон Нейман показал невозможность введения «скрытых параметров», изменение которых можно было бы считать ответственным за реализацию того или иного конкретного состояния квантовой системы.

Можно, однако, заметить, что в основе всех заключений об акаузальном характере квантовой механики лежит допущение о том, что причинность равнозначна предсказуемости каждого отдельного события подобно тому, как это имеет место в класси-

* Следует, конечно, отдавать себе отчет в том, что вероятностный характер классической статистики также имеет объективную природу и отражает не зависящие от нас свойства очень больших систем объектов (подробнее см. об этом в моиографии [22]). Кроме того, как показал Н. С. Крылов, законы классической статистики нельзя целиком свести к законам лапласовски детерминированной механики Ньютона [23].

** Иногда эту особенность квантовой механики выражают также в виде положения о принципиально неконтролируемом воздействии прибора на микроЭксперимент.

ческой физике, для которой поведение квантовой системы, действительно, необъяснимо акаузально. В то же время известная квантовая теория является принципиально статистической теорией и не применима к единичным микроявлениям. Вопрос, почему данный электрон попал именно в ту, а не в иную точку экрана, просто не имеет смысла в этой теории; в современной квантовой механике можно говорить о причинности лишь в применении к ансамблю событий и выражать ее на языке волновой функции (см. примечание на с. 29).

Физическая причина принципиально неустранимой статистичности микроявлений обусловлена, по-видимому, тем, что каждая микрочастица неразрывно связана с частицами, рождающимися при вакуумных флюктуациях, и со всем невообразимо сложным переплетением связей микрочастиц, образующих окружающую ее макрообстановку. Имея в виду эти связи, можно было бы сказать, что движение каждой индивидуальной частицы причинно обусловлено, однако причина в свою очередь имеет вероятностный характер (и т. д. без конца). Говоря словами Гейзенберга, «если мы хотим знать причину, почему α -частицы излучаются именно в данный момент, то, по-видимому, должны для этого знать микроскопическое состояние всего мира, к которому мы и сами принадлежим, а это, по-видимому, невозможно» [27, с. 65]. Для того чтобы перечислить сколько-нибудь значительную часть связей микрочастицы, потребовалось бы время, наверное, существенно превышающее известный нам возраст Вселенной.

Однако интерпретация физического смысла волновой функции — это только один аспект проблемы причинности в квантовой механике; другой ее аспект касается изменения этой функции, т. е. состояний квантовой системы, со временем. Так же, как и в классической физике, состояние квантовой системы в момент времени t однозначно определяется заданием ее состояния в любой другой момент t_0 : $\psi(t) = \Phi[\psi(t_0)]$, а условие причинности в нерелятивистском приближении по-прежнему выражается требованием $t_0 < t$ и не исключает существования дальнодействующих сил. Акаузальные эффекты устраняются путем учета релятивистской инвариантности. Условие причинности при этом формулируется в виде, очень близком к соответствующей классической формулировке, с тем лишь отличием, что теперь оно относится не к отдельным частицам, а к ансамблю частиц (или измерений — в другой интерпретации), описываемых ψ -функцией. В частности, многовременные соотношения (17) приобретают вид

$$d^2\psi/dt_i dt_j = d^2\psi/dt_j dt_i \quad (23)$$

и, как легко убедиться с помощью многовременной системы уравнений Шредингера $i\hbar \partial\psi/\partial t_k = H_k \psi$, эквивалентны требованию обращения в нуль коммутационной скобки гамильтонианов взаимодействия

$$[H_i, H_j] \sim \mathcal{D}(x_i - x_j) = 0. \quad (24)$$

Блох показал [28], что если состояние системы определено на пространственно-подобной поверхности $|x_i - x_j| > c|t_i - t_j|$ и, следовательно, измерения, выполняемые над различными частицами, не влияют друг на друга, то волновая функция $\psi = \psi(x_1, s_1, t_1; \dots; x_n, s_n, t_n)$, зависящая от координат, спинов и временных переменных всех n частиц, имеет смысл амплитуды вероятности того, что при измерении координаты и спина первой частицы в момент времени t_1 будут получены значения x_1 и s_1 , при измерении координаты и спина второй частицы в момент t_2 — значения x_2, s_2 и т. д. *

В гейзенберговском представлении, когда волновая функция считается не зависящей от времени ($\partial\psi/\partial t_i = 0$) и вся временная зависимость переносится на канонически сопряженные операторы, условия интегрируемости по внешнему виду не отличаются от соотношений (17). С помощью канонических уравнений движения для операторов нетрудно показать, что эти соотношения эквивалентны (24).

§ 10. Причинность в квантовой теории поля

Еще более последовательную формулировку причинности можно получить, если рассматривать микрочастицы не как заранее заданные индивидуальности, а как кванты соответствующих полей. Волновая функция (или, как принято сейчас говорить, — вектор состояния) зависит в этом случае от бесконечного числа динамических переменных всех взаимодействующих между собой полей. Изменения ее во времени определяются сверхмноговременным уравнением Шредингера

$$i\hbar \sigma \delta\psi[\sigma]/\delta\sigma(x) = H[x, \sigma]\psi[\sigma], \quad (25)$$

где $H[x, \sigma]$ — гамильтониан взаимодействия, содержащий в общем случае члены, явно зависящие от пространственно-подобной гиперповерхности σ .

Уравнение (25) часто называют уравнением Томанага — Швингера. Условие интегрируемости уравнения (25)

$$\frac{\delta^2\psi[\sigma]}{\delta\sigma(x')\delta\sigma(x'')} = \frac{\delta^2\psi[\sigma]}{\delta\sigma(x'')\delta\sigma(x')} \quad (26)$$

удовлетворяется, если выполнено соотношение

$$[H[x'', \sigma], H[x', \sigma]] + i \frac{\delta H[x', \sigma]}{\delta\sigma(x')} - i \frac{\delta H[x'', \sigma]}{\delta\sigma(x'')} = 0, \quad (27)$$

* Многовременную формулировку разработали П. Дирак, В. А. Фок и Б. Подольский сначала для квантовой теории [29], и лишь значительно позднее ее применили к исследованию акаузальных эффектов в классической физике [21]. Сверхмноговременную формулировку впервые ввел в квантовой теории поля Томанага [30] и подробно исследовал Швингер [31].

которое автоматически исключает сверхсветовые скорости сигналов и совместно с начальным условием $\sigma_0 > \sigma$ может рассматриваться как формулировка причинности в теории поля.

В представлении Гейзенberга, когда волновое уравнение вырождается в тождество $\delta\psi/\delta\sigma(x) = 0$, а полевые операторы подчиняются уравнениям, зависящим от взаимодействия, соотношение (27) заменяется эквивалентным условием обращения в нуль коммутационной скобки $[A(x'), A(x'')]$ для бозонных операторов поля и антисимметрической скобки $[\varphi(x'), \varphi(x'')]_+$ для фермионных операторов поля. При этом условии изменения полей $\delta A(x)$ и $\delta\varphi(x)$ не влияют на величину этих полей в точке x_0 (рис. 10)*.

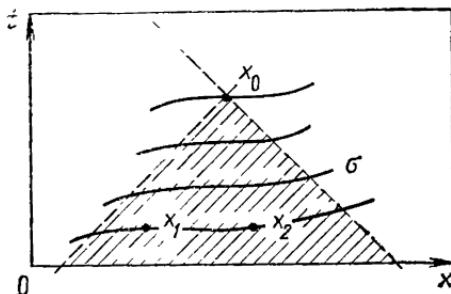


Рис. 10. Событие в точке x_0 полностью определяется взаимодействиями в заштрихованном времеподобном конусе. Состояния системы заданы на пространственно-подобных гиперплоскостях σ , где все полевые величины не зависят друг от друга. Математически это выражается условиями $[A(x_0), A(x_i)] \neq 0$, $[A(x_1), A(x_2)] = 0$

Очень часто (см., например, [32, с. 217; 33, с. 214; 34, с. 150]) условие коммутативности операторов поля рассматривают как «условие микропричинности». Однако важно подчеркнуть, что одного только условия коммутативности еще недостаточно для того, чтобы обеспечить причинную связь событий, так как при этом не исключаются акаузальные сигналы из будущего в прошлое. Формулировка причинности должна обязательно включать еще также и «требование запаздывания» ($t_0 < t$); лишь в этом случае события рождения и поглощения частиц (реальных и виртуальных) оказываются причинно связанными между собой, т. е. акт рождения частицы всегда предшествует акту ее поглощения [36]. Именно благодаря этому обстоятельству во все соотношения (матричные элементы), описывающие взаимодействия частиц, входит не функция $\mathcal{D}(x' - x'')$, а так называемая каузальная функция $\mathcal{D}_c(x' - x'')$, которая при $t' < t''$ описывает процесс рождения частицы в точке x' и ее поглощение в точке x'' , а при $t' > t''$ — процесс испускания частицы в точке x'' и ее поглощение в точке x' .

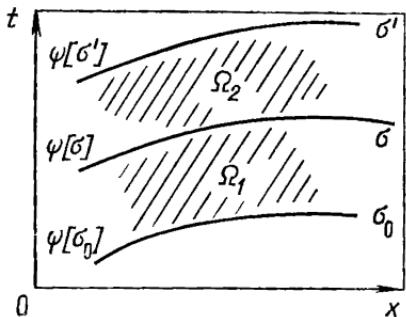
* На первый взгляд может показаться, что фермионные поля не удовлетворяют условию причинности. Однако во все наблюдаемые величины операторы фермионного поля входят в виде билинейных комбинаций, и комбинации, взятые в разделенных пространственно-подобных интервалах точек, как можно показать, коммутируют друг с другом, если операторы спинорного поля антисимметричны.

[36, с. 103]. Функция \mathcal{D}_c является обобщением рассмотренной выше «классической» функции \mathcal{D}_{ret} .

Существенно, что все рассмотренные до сих пор определения причинно-следственной связи тесно связаны с пространственно-временной локализацией микроявлений. Значительно более общую и в настоящее время наиболее последовательную формулировку причинности, обобщающую условия интегрируемости релятивистско-инвариантных уравнений движения и автоматически учитываемую условие $t_0 < t$, предложил Н. Н. Боголюбов [36, § 17.5, 47.3]. Как мы увидим, по сравнению с другими, эта формулировка, вообще говоря, совместима со значительно более мягкими тре-

Рис. 11. Оператор рассеяния S связывает состояния системы на различных пространственно-подобных поверхностях:

$$\begin{aligned}\psi[\sigma] &= S[\Omega_1]\psi[\sigma_0]; \\ \psi[\sigma'] &= S[\Omega_1 + \Omega_2]\psi[\sigma_0] = \\ &= S[\Omega_2]S[\Omega_1]\psi[\sigma_0]\end{aligned}$$



бованиями к пространственно-временной локализации рассматриваемых явлений.

Формулировка причинности Боголюбова заключается в требовании, чтобы любое событие, произшедшее в физической системе, могло оказать влияние на ход эволюции этой системы лишь в будущем и не могло влиять на ее поведение в прошлом — во времена, предшествовавшие данному событию. Другими словами, если Ω_1 и Ω_2 — две смежные пространственно-временные области, расположенные относительно пространственно-подобной поверхности σ соответственно в прошлом и в будущем, а S -оператор, описывающий развитие физической системы во времени (рис. 11), то

$$S[\Omega_1 + \Omega_2] = S[\Omega_2]S[\Omega_1]. \quad (28)$$

С помощью функциональных производных интегральное условие причинности (28) может быть преобразовано также в дифференциальную форму, определяющую изменение оператора S в зависимости от изменения входящих в него полевых величин в некоторых пространственно-временных точках x_1 и x_2 . В рамках релятивистско-инвариантных теорий такая формулировка причинности сразу же исключает возможность сверхсветовых скоростей передачи сигналов, при допущении которых временной порядок событий оказывается неопределенным и зависит от выбора систем-

мы координат*. Все выражения, зависящие от пространственно-подобных интервалов $|x' - x''| \equiv |\Delta x| - c|\Delta t| > 0$, оказываются при этом автоматически равными нулю.

Н. Н. Боголюбов и его сотрудники показали, что условия причинности (28), условия унитарности и релятивистской инвариантности, а также некоторые другие постулаты теории поля оказываются вполне достаточными для того, чтобы построить оператор рассеяния $S[\sigma, \sigma_0]$. В частном случае локальной теории поля, где гиперповерхности σ и могут быть выбраны сколь угодно близко друг к другу ($\sigma = \sigma_0 + \delta\sigma$), построенный таким образом аппарат сводится к обычной теории уравнения Шредингера (25). Вместе с тем формулировка причинности (26) и построенная на ее основе матрица рассеяния $S[+\infty, -\infty]$, которая непосредственно, минуя какие-либо промежуточные состояния, связывает падающую волну до взаимодействия и рассеянную волну после взаимодействия, предоставляют возможности и для различных обобщений, далеко выходящих за рамки локальных теорий (см. гл. 4) **.

§ 11. Макро- и микропричинность

Замечательно, что дифференциальная формулировка причинности Боголюбова, хотя ее и называют часто условием микропричинности, в действительности не имеет какого-либо специфически квантового характера и может применяться также в классической теории (например, по отношению к функции действия S , которая может включать как механические, так и полевые переменные и зависеть от пространственно-подобных гиперповерхностей σ). Другими словами, эта формулировка представляет собой весьма общее выражение *макропричинности*, применяемое к микроявлениям.

Такой же «макроскопический характер» имеют и другие рассмотренные выше формулировки причинности, связанные с условием интегрируемости уравнений движения. Во всех случаях для описания изменения состояний микрочастиц в современной квантовой теории используют ту же форму причинно-следственной связи, что и в области макроскопических явлений, принципиальное различие касается лишь описания самого состояния — вероятност-

* Как отмечалось выше, одной лишь релятивистской инвариантности для такого исключения, вообще говоря, недостаточно, так как, например, нелокальные и некоторые варианты нелинейных теорий со сверхсветовыми сигналами могут удовлетворять требованиям формальной инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца.

** Впервые идею о матрице рассеяния высказал Гейзенберг [37, 38], который обратил внимание на то, что описание взаимодействий микрочастиц с помощью зависящих от времени уравнений движения «излишне детально» в том смысле, что в эксперименте мы всегда имеем дело лишь со свободными частицами до и после взаимодействия. По мнению Гейзенberга только эти «реально наблюдаемые» величины должны входить в теорию.

ного в квантовой механике и лапласовски детерминированного в макроскопической физике.

Насколько неустранимо это различие? Даже беглый обзор развития наших представлений о строении вещества и анализ быстро нарастающего потока новых экспериментальных данных о характере микроскопических явлений позволяют заключить, что по мере дальнейшего углубления в область малых пространственно-временных масштабов все более отчетливо проступают две дополняющие друг друга тенденции: с одной стороны, для описания простейших физических объектов, с которыми мы имеем дело, приходится использовать образы все большей информативной емкости; с другой стороны, возрастает роль случайного фактора и развертывающаяся перед нами физическая картина все дальше и дальше отходит от призрачных линий лапласовского детерминизма в сторону сложных вероятностных построений. Эти тенденции органически связаны между собой, так как вероятностный элемент проявляется как мера, характеризующая множество значений новых степеней свободы, возникающих по мере открытия все большей информативной емкости рассматриваемых физических объектов.

Как с онтологической, так и с гносеологической точки зрения две указанные тенденции весьма точно отражают общий характер развития физики микромира.

Если в квантовой механике атомов и молекул статистически описываются движение и детали строения частиц, то в физике элементарных частиц статистический элемент органически входит уже в понятие самой частицы; чрезвычайно сложной, статистически изменяющейся во времени становится структура этих частиц. Поэтому едва ли можно надеяться на успех предпринимаемых некоторыми авторами попыток свести вероятностное содержание современной физики элементарных частиц к каким-то более глубоким, лапласовски детерминированным законам (к «динамическим законам», по терминологии Я. П. Терлецкого, — см. [39]). Так, совершенно необоснованными представляются следующие утверждения Я. П. Терлецкого: «Характеризуя элементарные физические законы, мы прежде всего можем утверждать, что они являются законами динамического типа. Действительно, элементарные законы по самой своей сути должны отражать все движение полностью и не могут содержать в себе неизвестных, случайных элементов, так как введение последних означает допущение других неизвестных, еще более элементарных законов, управляющих этими элементами (если не становиться на точку зрения нематериальности этих элементов) <...>.

Оставляя примат за динамическими законами, мы допускаем, что за всяkim последним, известным нам законом, имеющим статистический характер, скрывается более элементарный закон динамического характера» [39, с. 20]. Эти утверждения являются всего лишь декларацией.

Конечно, почти никогда нельзя «математически строго» доказать бесперспективность какого-либо направления. Однако в науке засчитывается лишь то, что позволяет предсказывать новое. И не случайно многочисленные поиски «элементарных динамических законов» до сих пор не дали ни одного, буквально ни одного, предсказания, которое было бы подтверждено экспериментальными исследованиями и в то же время не содержалось бы в общепринятой квантовой теории.

Иногда можно слышать мнение, что «строго динамическое» объяснение «вероятностной причинности» квантовой механики не-пременно должно существовать, так как это, якобы, следует из самых общих положений диалектического материализма, в частности — из закона отрицания отрицания.

Так, Я. П. Терлецкий утверждает [40], что поскольку квантовая теория возникла в физике как отрицание классического детерминизма, то новая, более общая теория (имеется в виду теория со скрытыми параметрами) в соответствии с законом отрицания отрицания, который представляет собой, говоря словами Ф. Энгельса, чрезвычайно общий и именно поэтому чрезвычайно широко действующий и важный закон развития природы, истории и мышления, должна возникнуть «как отрицание индетерминизма концепции дополнительности» и «лишь слепая вера в незыблемость представлений, ставших привычными, поддерживает уверенность в несменяемости концепции дополнительности и является единственным аргументом против применимости закона отрицания отрицания в теории элементарных частиц» [40, с. 108].

Следует сразу же отметить, что упоминание о «концепции дополнительности» лишь затемняет суть обсуждаемого вопроса, так как может создаться впечатление, что автор выступает только против этой концепции, с которой не согласны многие физики. Однако, во-первых, независимо от понимания роли концепции дополнительности в квантовой теории нельзя согласиться с утверждением о принципиальном индетерминизме этой концепции (см. об этом, например, брошюру В. А. Фока [41]); во-вторых, формулировка квантовой теории на основе концепции дополнительности не является единственно возможной: квантовую теорию можно сформулировать и не опираясь на эту концепцию (например, в терминах квантовых ансамблей).

Для квантовой теории существенна не сама концепция дополнительности, а соотношение неопределенностей, соответствующее идеи вероятностного описания микроявлений и в сжатой форме выраждающее принцип квантования. Именно против этого соотношения, т. е. против самого принципа квантования, и выступает главным образом Я. П. Терлецкий. Он пишет о том, что «допуская скрытые параметры, мы неизбежно отказываемся от соотношения неопределенностей где-то на уровне внутри элементарных частиц» [40, с. 108]. В этой же статье мы встречаем несколько подобных высказываний. Таким образом, фактически ставится знак равен-

ства между признанием действия закона отрицания отрицания в квантовой теории и отказом от соотношения неопределенностей. Подобное заключение, если оно было справедливым, имело бы чрезвычайно важное значение для физики, так как в этом случае стали бы совершенно бессмысленными и заведомо обречеными на неудачу все нелокальные квантовые теории поля, все попытки построить нелинейную квантовую теорию и т. д., важнейшей задачей современного эксперимента явилось бы подтверждение нарушения принципа квантования в малых пространственно-временных областях [42]. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Диалектическое отрицание в квантовой физике проявляется при переходе от макроскопических процессов, характеризующихся большими энергиями, к молекулярным и ядерным явлениям с относительно малыми количествами энергии и при замене классических законов квантовыми (соответственно классическая теория с ее точной пространственно-временной локализацией частиц заменяется более точной квантовой теорией, где о траектории частицы можно говорить лишь с точностью до длины ее дебройлевской волны λ). В области нерелятивистских квантовых явлений длина λ настолько велика, что траектория частицы теряет всякий смысл. (Последнее обстоятельство проявляется, в частности, в том, что рассеяние низкоэнергетических частиц целиком описывается S -волной с неопределенным параметром удара.) С увеличением энергии взаимодействующих частиц длина волны уменьшается, все более существенное значение приобретает корпускулярный аспект явления и, как это уже обсуждалось в начале предыдущей главы, движение частиц все более локализуется вдоль определенных траекторий: происходит отрицание отрицания, и картина явления снова приобретает классические черты.

Однако вследствие диалектического характера отрицания отрицания при этом происходит возврат не просто к старому, а к «якобы старому»; сходство с классической стадией лишь формальное, содержание же первой классической и третьей «квазиклассической» стадий оказывается существенно различным. В третьей стадии явление не только не перестает быть квантовым, но квантовые свойства в определенном смысле становятся еще более важными, чем во второй стадии, так как при высоких энергиях происходит интенсивное взаимопревращение и рождение частиц. Упругое рассеяние становится чисто дифракционным, и если в классической стадии для *каждой* частицы с фиксированным значением параметра удара можно точно указать угол рассеяния и движение ее строго детерминировано в лапласовском смысле этого слова, то в квазиклассической стадии предсказать значение угла рассеяния можно лишь для *ансамбля частиц* (или измерений), и причинность здесь выражается на языке волновых функций. (Что касается *каждой* отдельной частицы, то она или поглощается, или проходит мишень без взаимодействия.) Хотя квазиклассическая картина весьма напоминает классическую, содержа-

ние ее является вероятностным*. Понятно, что роль принципа квантования и соответственно соотношения неопределенностей при этом не уменьшается.

Конечно, это не означает, что известные законы квантования следует рассматривать как абсолютные и применимые в сколь угодно малых интервалах Δx и Δt . Вполне возможно, что в будущем придется существенно изменить эти законы, однако здесь нет прямой связи с действием закона отрицания отрицания при переходе от квантовой стадии микроявлений к квазиклассической. Это чисто физический вопрос. В настоящее время нет никаких данных об изменении законов квантования в области доступных сейчас интервалов Δx и Δt .

Нельзя согласиться также с утверждением Я. П. Терлецкого о том, что «с физической точки зрения невозможно выдвинуть какие-либо возражения против теории, в которой вместо обычного соотношения неопределенностей будет иметь место, например, соотношение вида:

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar \mathcal{F}(\Delta q), \quad (29)$$

причем $\mathcal{F} \rightarrow 1$ при $\Delta q \gg l_0$ и $\mathcal{F} \rightarrow 0$ при $\Delta q \ll l_0$, где l_0 — константа размерности длины» [40, с. 106]. Малые расстояния, согласно этой теории, не квантуются, и остается непонятным, как с помощью такой теории можно объяснить процессы взаимопревращения и множественной генерации частиц, образование резонансов, процессы распада и множество других явлений, количественное и качественное значение которых, как показывает эксперимент, становится все более важным по мере дальнейшего изучения явлений в ультрамалых пространственно-временных областях.

Таким образом, изменение характера физических явлений по мере углубления в область все более малых пространственно-временных масштабов полностью согласуется с диалектическим законом отрицания отрицания, но на этом основании нельзя делать никаких заключений о необходимости отказа от известных законов квантования.

Материалистический диалектический метод, являясь по самой своей сути глубоко критическим, служит основой всякого научного исследования. Однако положения диалектического материализма имеют очень общий характер, и при решении конкретных естественно-научных проблем, особенно при решении вопроса о том, является ли та или иная конкретная физическая теория уже устаревшей, нельзя применять их формально, без тщательного анализа конкретной экспериментальной ситуации; в противном случае мы

* Как и в геометрической оптике, для описания рассеяния частиц высокой энергии используют коэффициенты поглощения (см. рис. 4), однако эти коэффициенты определяются изменяющимися при виртуальных процессах составом и плотностью облака виртуальных частиц вокруг центра частицы-мишени и, следовательно, в отличие от классической теории также имеют статистическую, вероятностную природу.

неминуемо окажемся на позициях натурфилософии, и это существенно затормозит дальнейшее развитие.

Наряду с большим числом попыток найти «динамическую реализацию вероятностной причинности» иногда высказывают и противоположную точку зрения, согласно которой именно статистический, а не динамический тип закономерности является основным и определяющим (см., например, книгу Г. Я. Мякишева [43]). Однако эта крайняя точка зрения также представляется несколько односторонней. О диалектическом соотношении статистического и динамического аспектов природы очень хорошо сказал Винер [44, с. 314]: «Мир представляет собой некий организм, закрепленный не настолько жестко, чтобы незначительное изменение в какой-либо его части сразу же лишало его присущих ему особенностей, и не настолько свободный, чтобы всякое событие могло произойти столь же легко и просто, как и любое другое. Это мир, которому одинаково чужда окостенелость ньютоновской физики и аморфная податливость состояния максимальной энтропии или тепловой смерти, когда уже не может произойти ничего по-настоящему нового. Это Мир Процесса», в котором, — добавим от себя, — статистические законы могут выступать как основа и в предельных случаях «вырождаться» в динамические закономерности, и наоборот.

Независимо от решения вопроса о происхождении вероятностных закономерностей квантовой механики, в последние годы обсуждалось несколько возможных обобщений известных формулировок причинности. Так, можно попытаться выразить причинность как «определенную форму упорядочения событий в пространстве и времени», когда одно событие может повлиять на другое только в том случае, если взаиморасположение этих событий в пространстве и времени позволяет сделать это без нарушения правил их упорядочения. Однако сформулированное в таком виде определение еще недостаточно конкретизировано: весь вопрос в том, что понимать под «определенной формой упорядочения». Если для упорядочения событий использовать сигналы с максимальной скоростью распространения, не превышающей скорости света в вакууме (а иных мы пока не знаем), то мы придем к обычной картине деления пространственно-временного многообразия на время-подобные (каузальные) и пространственно-подобные (акаузальные) области (см. подробнее [45, с. 45]). Вместе с тем рассматриваемая формулировка допускает и другие, более общие функциональные способы пространственно-временного упорядочения событий, в том числе и такие, которые не учитывают главный признак причинно-следственных цепей — генетическую связь событий. Примером могут служить так называемые сопутствующие (или синхронизированные) события, которые не имеют непосредственной причинной связи между собой, но появление одного из них непременно сопровождается возникновением другого. Существуют ли другие формы пространственно-временного упорядочения

генетически связанных явлений, отличные от современного понимания причинности, — на этот вопрос рассматриваемое определение не дает ответа.

Некоторые авторы (см., например, [46, с. 168]) подчеркивают, что любая причинная связь — это прежде всего передача информации, поэтому открывается возможность обобщения статистической формы причинности современной квантовой теории путем привлечения идей теории информации, которые в общем случае представляются значительно более общими, чем вероятностно-статистические идеи. Можно ожидать, что формулировка причинности на основе понятия информации будет распространяться на более широкий круг явлений. Однако это направление пока еще совершенно не разработано.

Во многих работах отмечается, что понятие причинно-следственной связи микроявлений заведомо потребует обобщения, если будет обнаружено (а это весьма вероятно), что преобразования Лоренца, посредством которых выражается наше представление об инвариантности временного порядка событий, является всего лишь частным случаем каких-то более общих трансформаций. В частности, не исключено, что «в малых областях <...> пространство и время своеобразным образом стерлись, так что понятия «раньше» или «позже» больше не могут быть правильно определенными» [25, с. 235]. Эти и подобные им идеи открывают широкие возможности для обобщения понятия причинности в ультрамалых интервалах Δx и Δt . Временной порядок в этом случае будет зависеть от выбора системы координат, и в основу определения генетической связи событий, возможно, придется положить понятие взаимодействия, связывая с причинностью такую взаимосвязь явлений, когда изменение одного из них, вне зависимости от времени, с необходимостью сопровождается изменением другого. К рассмотрению открывающихся на этом пути возможностей мы еще вернемся в гл. 4, однако следует сразу же отметить, что все эти возможности имеют пока лишь чисто гипотетический характер и не дают ответа на основной вопрос, как далеко в область ультрамалых пространственно-временных масштабов «простирается» известная нам сейчас форма причинности, которая, как мы видели, в существенной степени сохраняет макроскопические черты. Ответ на этот вопрос в настоящее время можно получить лишь с помощью эксперимента.

Прекрасное согласие вычислений, выполненных с помощью квантовой электродинамики, с опытом показывает, что по крайней мере в электромагнитных процессах известные нам законы причинности справедливы вплоть до масштабов $\Delta x \approx 2 \cdot 10^{-15}$ см и $\Delta t \sim 10^{-25}$ сек. Что касается сильных взаимодействий, то ситуация здесь значительно более сложная, поскольку мы пока не располагаем последовательной теорией, а согласие или, наоборот, расхождение с опытом результатов, полученных с помощью каких-либо моделей, всегда можно объяснить грубостью использованных

аппроксимаций. Поэтому для достаточно надежных заключений следует сравнивать с опытом только те теоретические выводы, которые получены на основе самых общих принципов квантовой теории, без использования малооправданных разложений или модельных упрощений. Именно такими свойствами характеризуются дисперсионные соотношения, связывающие действительную и минимую части амплитуд физических процессов, в частности процессов упругого рассеяния двух элементарных частиц. Эти соотношения рассматриваются в следующей главе.

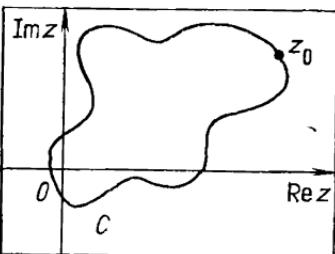
§ 12. Дисперсионные соотношения и их экспериментальная проверка

С математической точки зрения дисперсионные соотношения представляют собой частный случай известной теоремы Коши о том, что интеграл от дроби $f(z)/(z-z_0)$, где $f(z)$ — аналитическая функция комплексной переменной z по любому замкнутому контуру C , содержащему точку z_0 ,

$$\oint_C \frac{f(z)}{z-z_0} dz = i\pi f(z_0) \quad (30)$$

(рис. 12). В качестве функции f выбирают амплитуду упругого рассеяния на угол $\theta=0$ (т. е. рассеяния вперед), а переменную z

Рис. 12. Контур интегрирования в теореме Коши: $z=Re z+i Im z$ — комплексная переменная; z_0 — произвольная точка, принадлежащая контуру C



полагают равной полной энергии рассеивающейся частицы E , формально рассматриваемой как комплексная величина:

$$f(z) \rightarrow A(E); \quad E \rightarrow Re E + i Im E.$$

Определенная таким образом функция $A(E)$ имеет смысл наблюдаемой в экспериментах амплитуды физического процесса лишь для действительных положительных значений $E=Re E \geq m$ (рис. 13), причем кинетическая энергия частицы $T=E-m$ является действительной и положительной величиной; во всей остальной области при отрицательных и комплексных значениях T функция $A(E)$ представляет собой всего лишь некоторую вспомогательную величину [«аналитическое продолжение» физической амплитуды $A(E)$], к которой применяется теорема Коши.

Если контур интегрирования выбрать в виде полуокружности с радиусом $R \equiv |E| \rightarrow \infty$, опирающейся на действительную ось $\text{Re } E$ (см. рис. 13), и допустить, что при очень больших значениях $|E|$ амплитуда $A(E)$ достаточно быстро уменьшается по абсолютной величине, то интеграл по бесконечной полуокружности в вы-

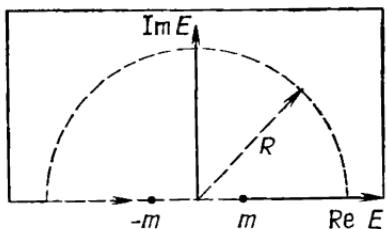


Рис. 13. Комплексная область определения амплитуды $A(E)$. Физическое значение, измеряемое в эксперименте, амплитуда имеет только на действительной оси при $\text{Re } E \geq m$ (m — масса рассеивающейся частицы, E — ее полная энергия); лишь в этом случае кинетическая энергия $T = E - m \geq 0$. Пунктиром показан бесконечный контур интегрирования, выбираемый для доказательства дисперсионных соотношений. Значения $A(E)$ на действительной оси при $E \leq -m$ выражаются через амплитуду рассеяния античастицы с энергией $E \geq m$. При пion-нуклонном рассеянии на угол $\theta = 0$ вклад дисперсионного интеграла по «нефизической области» $0 \leq E \leq m$ выражается в явном виде через постоянную взаимодействия и массы сталкивающихся частиц. Для нуклон-нуклонного рассеяния нефизическая область дает вклад, который в настоящее время можно выразить через экспериментально наблюдаемые величины лишь с помощью некоторых моделей

жаются через амплитуду рассеяния античастицы с энергией $E \geq m$. При пion-нуклонном рассеянии на угол $\theta = 0$ вклад дисперсионного интеграла по «нефизической области» $0 \leq E \leq m$ выражается в явном виде через постоянную взаимодействия и массы сталкивающихся частиц. Для нуклон-нуклонного рассеяния нефизическая область дает вклад, который в настоящее время можно выразить через экспериментально наблюдаемые величины лишь с помощью некоторых моделей

ражении (30) становится исчезающе малым и формула Коши приобретает вид

$$p \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{A(E') dE'}{E' - E} = i\pi A(E), \quad (31)$$

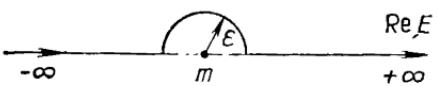
где E — некоторая точка на действительной оси, а интеграл берется в смысле главного значения, т. е. как предел

$$p \int_{-\infty}^{+\infty} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left\{ \int_{-\infty}^{E-\epsilon} + \int_{E+\epsilon}^{\infty} \right\}.$$

Используемое при выводе дисперсионных соотношений предположение об уменьшении амплитуды $A(E)$ в области больших энергий не очень существенно, так как в качестве функции $f(E)$ в исходной теореме Коши можно использовать выражение $f(E)/(E-m)^n$, деформировав контур интегрирования так, чтобы исключить точку $E=m$ (функция, к которой применяется теорема Коши, должна быть аналитической внутри и на контуре C ; рис. 14). Выбрав достаточно большое значение n , можно скомпенсировать и «подавить» вклад даже весьма быстро возрастающей функции $A(E)$. Вычисление предела интегрального выражения в точке $E \rightarrow m$ при переходе на действительную ось приводит к дополнительному полиному ($n-1$)-й степени, коэффициенты которого можно определить из сравнения с опытом (так называемая процедура вычитания).

Исключение из теоретических соотношений вклада практически недостижимой области очень высоких энергий, т. е. области очень малых интервалов Δx и Δt , является чрезвычайно важным пунктом теории. Чем большее значение n мы выберем, тем сильнее сужим ту область энергий, которая дает существенный вклад в рассматриваемые соотношения. Однако при этом возрастает число «вычитательных коэффициентов», которые должны определяться экспериментально. На практике выбирают разумный компромисс.

Рис. 14. Контур интегрирования для функции $f(z)/(E - m)^n$. Точка $E = m$ обходится по полуокружности с радиусом $\epsilon \rightarrow 0$. При этом интегрируемая функция остается аналитической во всех точках внутри и на контуре интегрирования и поэтому удовлетворяет условиям применимости теоремы Коши



По «оптической теореме» полное сечение взаимодействия

$$\sigma = (4\pi/k) \operatorname{Im} A, \quad (32)$$

где k — импульс рассеивающейся частицы, поэтому ограничение на амплитуду $A(E)$ эквивалентно ограничению степени роста сечения $\sigma(E)$. Известные в настоящее время экспериментальные данные показывают, что при очень высоких энергиях сечение $\sigma(E)$ становится почти постоянным. Для компенсации такой степени роста достаточно положить $n=2$.

Использовав, далее, некоторые теоремы квантовой теории поля, с помощью которых амплитуду упругого рассеяния частицы a на частице b при отрицательной «энергии» $E < 0$ можно выразить через амплитуду упругого рассеяния соответствующей античастицы \bar{a} на частице b при положительной энергии $E > 0$, и выполнив некоторые преобразования (см. [36]), получим интегральные выражения, которые в ряде случаев, например для упругого пиона-нуклонного рассеяния, содержат только наблюдаемые величины:

$$D_{\pm}(E) = \frac{1}{2} (D^0_+ + D^0_-) + \frac{E}{2m} (D^0_{\pm} - D^0_{\mp}) - \\ - \frac{2f^2}{m^2} \frac{k^2}{(m^2/2M) + E} + \frac{k^2}{4\pi^2} p \int_m^{\infty} \frac{dE'}{k'} \left[\frac{\sigma_{\pm}(E')}{E' - E} + \frac{\sigma_{\mp}(E')}{E' + E} \right]. \quad (33)$$

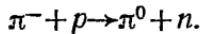
В левых частях этих двух соотношений стоят действительные части амплитуд упругого $(\pi^{\pm} - p)$ - и $(\pi^{\mp} - p)$ -рассеяния $D_{\pm} \equiv \operatorname{Re} A_{\pm}$, определяемые из анализа измеряемых на опыте дифференциальных сечений рассеяния, а в правых частях — интегралы от полных сечений $(\pi^{\pm} - p)$ -взаимодействий σ_{\pm} и алгебраическая

часть, зависящая от масс мезона и протона m и M , постоянной пион-нуклонной связи f^2 , импульса мезона $k = \sqrt{E^2 - m^2}$ и известных длин рассеяния $D_{\pm}^0 \equiv D_{\pm}(m)^*$.

Впервые соотношение такого типа получили методами классической электродинамики в конце 20-х годов Крамерс и Крониг для комплексного оптического показателя преломления. Физический смысл полученного ими соотношения заключался в том, что поглощение света при прохождении сквозь среду (т. е. наличие отличной от нуля мнимой «абсорбционной» части показателя преломления) сопровождается преломлением, дисперсией световой волны. По аналогии с оптической формулой Крамерса—Кронига интегральные выражения типа (33) принято называть дисперсионными соотношениями. Как и в случае рассеяния света, физической основой этих соотношений является процесс дифракции: искажение фронта падающей волны из-за ее поглощения проявляется как некоторое рассеяние этой волны (ср. с рис. 5).

Поскольку все величины в соотношениях (33) можно измерить на опыте, то, подставив их экспериментальные значения, мы можем путем сравнения правых и левых частей непосредственно проверить, с какой точностью выполняются на опыте полученные дисперсионные соотношения.

Независимую дополнительную информацию о согласии дисперсионных соотношений с опытом дают эксперименты по упругому $(\pi^- - p)$ -рассеянию с перезарядкой:



Сечение этого процесса σ_{ex} для угла $\theta = 0$ (т. е. когда π^0 -мезон вылетает по направлению движения первичного π^- -мезона) просто выражается через действительные и мнимые части амплитуды упругого $(\pi^\pm - p)$ -рассеяния:

$$\sigma_{ex}(E) = \frac{1}{2} [D_+(E) - D_-(E)]^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{k}{4\pi} \right)^2 [\sigma_+(E) - \sigma_-(E)]^2 \quad (34)$$

(см., например, [47, с. 143]) и, следовательно, может быть вычислено с помощью соотношений (33). При высоких энергиях сечения σ_+ и σ_- близки друг к другу, поэтому основную роль играет первый член выражения (34) и измерение сечения σ_{ex} представляет собой весьма чувствительный метод проверки дисперсионных соотношений.

Очень важно еще раз подчеркнуть, что соотношения (33) и (34) являются математически точными, полученными без каких-

* Эти длины как раз и являются вычитательными коэффициентами, о которых шла речь выше; член с f^2 возникает в результате вычисления дисперсионного интеграла по области «нефизических энергий» от нуля до m . Благодаря быстрому увеличению знаменателя в подынтегральном выражении при $E' \rightarrow \infty$ неизвестный из опыта вклад области очень больших энергий $E' \gg E$ оказывается пренебрежимо малым.

либо дополнительных предположений. Единственное существенное предположение — об аналитичности амплитуды рассеяния — было сделано в самом начале. (Предположение о степени роста амплитуды рассеяния при $E \rightarrow \infty$, как было показано, не является значительным ограничением и может быть обойдено с помощью «процедуры вычитания».)

В 1956 г. Н. Н. Боголюбову первому удалось доказать, что в рамках релятивистской инвариантной локальной теории амплитуды рассеяния $A(E)$, действительно, аналитическая функция, если выполняются три основных условия: во-первых, так называемое условие спектральности, т. е. требование, чтобы существовал полный дискретный ряд состояний с положительной энергией, описываемых волновыми функциями Φ_n , по которым можно разложить волновую функцию любого физического состояния $\Phi = \sum_n c_n \Phi_n$.

и чтобы вакуумное состояние Φ_0 было единственным состоянием с нулевой энергией; во-вторых, унитарность оператора рассеяния $SS^\dagger = 1$ (грубо говоря, это означает, что вероятности перехода в прямом и обратном направлениях одинаковы, а полная сумма вероятностей переходов равна единице); в-третьих, условие причинности (28), особенно важное и представляющее собой, в сущности, физическую основу дисперсионных соотношений. Нарушение этого условия приводит к тому, что амплитуда $A(E)$ перестает быть аналитической функцией [36]. В последующем доказательство дисперсионных соотношений было получено различными способами многими авторами.

Таким образом, согласие дисперсионных соотношений с опытом будет говорить о справедливости использованной при их выводе формулировки причинности, наоборот — различие значений правой и левой частей дисперсионного соотношения укажет на непригодность формулировки в области исследуемых масштабов $\Delta x \sim \lambda$ — длина дебройлевской волны в системе центра масс). Конечно, нарушение дисперсионных соотношений, вообще говоря, может быть обусловлено также нарушением и других постулатов квантовой теории поля, использованных при выводе дисперсионных соотношений, однако, как уже отмечалось, по сравнению со всеми другими постулатами принцип микропричинности (в его конкретных формулировках) является, по-видимому, наименее «устойчивым».

Во всяком случае обнаружение противоречия в дисперсионном соотношении будет очень серьезной заявкой на необходимость весьма существенного изменения этого принципа.

Очень важно отдавать себе отчет в том, что речь здесь идет не об изменении принципа причинности в его философском значении, а об изучении и модификации его конкретных «физических» прецедентов. Принцип причинности, утверждающий что все явления природы имеют свою причину, принадлежит к числу основных,

краеугольных положений диалектического материализма. Причинность — имманентное свойство материального мира, этот вывод основан на огромном человеческом опыте, однако конкретный смысл, вкладываемый в понятие причинности, зависит от уровня науки в данный исторический момент времени и по мере накопления новых фактов требует дальнейшего уточнения и обобщения.

Такой подход к проблеме причинности противостоит позитивистской точке зрения, согласно которой причинность представляется собой всего лишь некоторый приближенный, не имеющий характера необходимости закон, отражающий не столько само реальное бытие, сколько процесс его познания субъектом. Причинная взаимосвязь и обусловленность явлений с точки зрения позитивистов — гипотеза, «упорядочивающее правило», которое приближенно справедливо лишь для ограниченного круга явлений и не может рассматриваться в качестве принципа (см., например, работы Рассела [9, с. 344; 48, с. 393]).

Безусловно, как и все другие методологические принципы, положение о всеобщем характере причинности вытекает из опыта, однако эмпирический базис, на основании которого сформулировано это положение, настолько обширен и многогранен, а степень общности положения так велика, что оно выходит далеко за рамки того, что принято называть гипотезой, и представляет собой философский мировоззренческий принцип. Признание всеобщности причинной связи самым тесным образом связано с признанием неуничтожимости материи и ее движения; наличие хотя бы одного самопроизвольного, беспричинного явления было бы равнозначно возникновению (или соответственно исчезновению) какого-либо материального объекта или его движения.

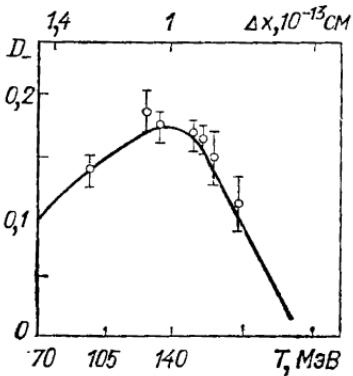
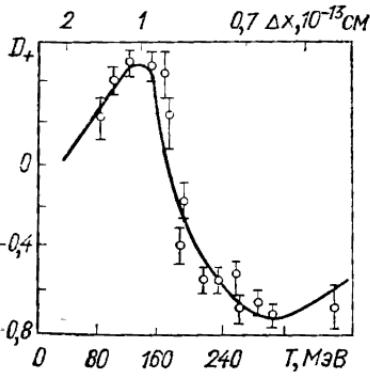
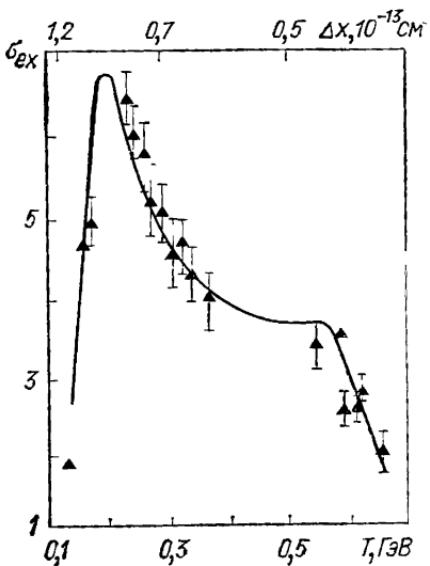
Сравнению дисперсионных расчетов с опытом посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ (см. статьи [49—51], где можно найти подробную библиографию). В течение последних 20 лет, по мере того как происходило накопление и уточнение данных по дифференциальным и полным сечениям взаимодействия частиц, не раз казалось, что учет новых экспериментальных данных приводит к нарушению дисперсионных соотношений. Именно такое положение было в 1958—1959 гг., когда анализ, выполненный итальянскими физиками Пули и Стангелини, показал нарушение дисперсионного соотношения для рассеяния π -мезонов на протонах в области значений $T \approx 300$ Мэв, т. е. уже для масштабов $\Delta x \approx 7 \cdot 10^{-14}$ см и $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-24}$ сек. (Эта так называемая «проблема Пули—Стангелини» в свое время очень темпераментно обсуждалась на различных конференциях и совещаниях по физике высоких энергий.) Последующие более тщательные экспериментальные и теоретические исследования устранили противоречия. Насколько хорошо согласуются с опытом дисперсионные соотношения в области значений $T < 1$ Гэв, т. е. при $\Delta x > 3 \cdot 10^{-14}$ см и $\Delta t > 10^{-24}$ сек, видно из рис. 15. В пределах погрешности измере-

ний никаких различий между экспериментальными и теоретическими значениями не заметно.

В 1964—1965 гг. группа американских физиков из Брукхейвенской лаборатории опубликовала результаты измерений дифференциальных сечений $(\pi^+ - p)$ - и $(\pi^- - p)$ -рассеяния при значительно больших энергиях, вплоть до $T = 25$ ГэВ [52, 53]. Результаты оказа-

Рис. 15. Сравнение экспериментальных и теоретических данных для $(\pi^\pm - p)$ -рассеяния:

кривые — расчет; точки — результаты измерений. По нижней оси абсцисс отложена кинетическая энергия первичных π -мезонов; по верхней — соответствующие значения Δx



лись не согласующимися с дисперсионными расчетами: полученные из опыта амплитуды D_+ и D_- заметно быстрее возрастали при увеличении энергии первичных π -мезонов, чем вычисленные с помощью дисперсионных соотношений, а главное — разность $D_+ - D_-$ имела другой знак по сравнению с тем, что предсказывали дисперсионные формулы (33). Однако и в этом случае более точные последующие измерения устранили расхождения с теорией.

Иллюстрацией может служить рис. 16, на котором приведены сечения рассеяния с перезарядкой σ_{ex} и отношения действительной и мнимой частей амплитуд упругого $(\pi^\pm - p)$ - и $(\pi^- - p)$ -рассеяния

$$\alpha_{\pm} = \operatorname{Re} A_{\pm} / \operatorname{Im} A_{\pm} = (4\pi/k)(D_{\pm} / \sigma_{\pm}), \quad (35)$$

очень часто используемые при анализе экспериментальных данных, так как они не зависят от выбора системы координат. Некоторые расхождения с опытом наблюдаются лишь для $(\pi^- - p)$ -

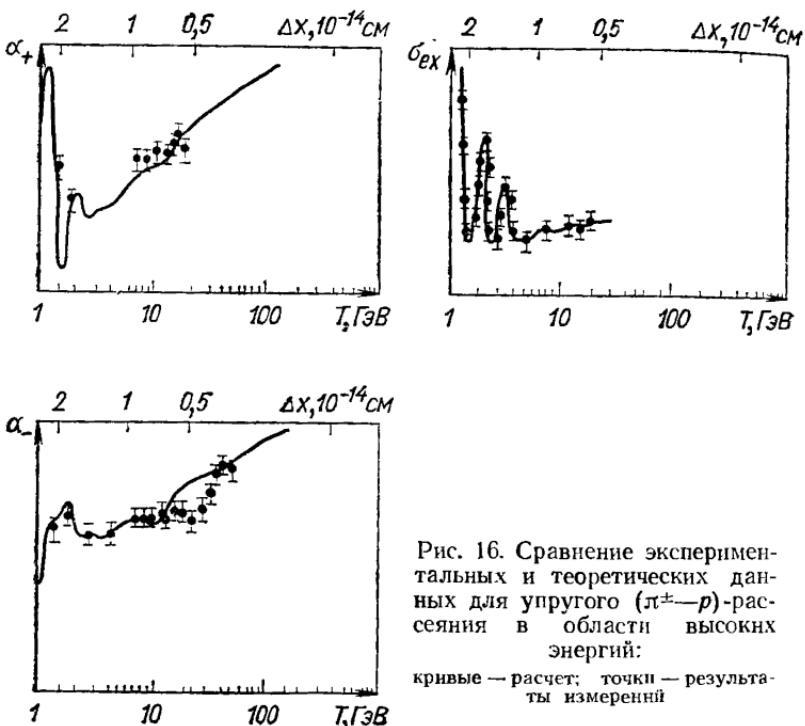


Рис. 16. Сравнение экспериментальных и теоретических данных для упругого $(\pi^\pm - p)$ -рассеяния в области высоких энергий:
кривые — расчет; точки — результаты измерений

рассеяния вблизи энергии 20 ГэВ, где результаты измерений располагаются несколько ниже расчетной кривой. Это, по-видимому, обусловлено статистическими неточностями измерений. Во всяком случае, погрешность измерений еще слишком велика, чтобы можно было серьезно говорить о нарушении дисперсионных соотношений.

В большом числе работ исследовались дисперсионные соотношения для упругого рассеяния протонов на протонах и на дейтронах. По сравнению с рассеянием π -мезонов анализ этих реакций, особенно $(p - d)$ -рассеяния, значительно более сложен и менее определен в смысле теоретических предсказаний, так как в отличие от упругого $(\pi - p)$ -рассеяния интеграл по «нефизической области» $0 \leq E \leq m$ (см. рис. 13) в этих случаях не удается вычислить аналитически. Однако в экспериментах с протонами дости-

жимы значения $T \approx 400$ Гэв, т. е. $\Delta x \approx 1,5 \cdot 10^{-15}$ см, что намного меньше значений, которые получаются сейчас в экспериментах с π -мезонами.

Вклад нефизической области для реакций рассеяния протонов можно представить в виде бесконечного ряда по степеням отношения массы протона к его полной энергии $m/E < 1$:

$$\int_{E < m} \dots dE' = c_0 + c_1 m/E + c_2 (m/E)^2 + \dots \quad (36)$$

с коэффициентами c_i , определяемыми из сравнения с известными экспериментальными значениями D_{\pm} . При таком подходе мы не

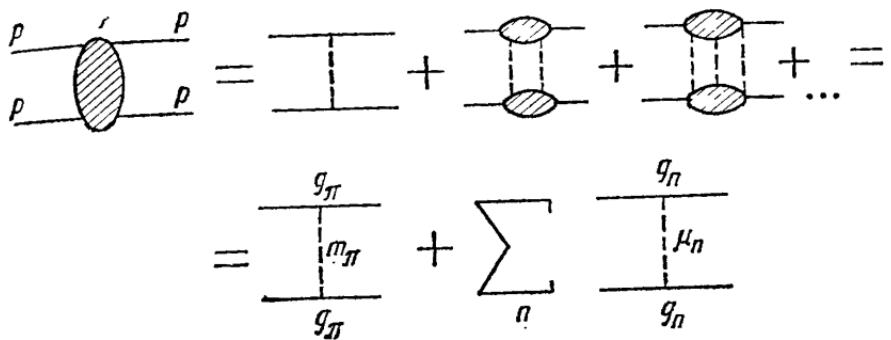


Рис. 17. Резонансная аппроксимация дисперсионного интеграла по нефизической области $E < m$. Диаграммы, описывающие многочастичные промежуточные состояния, приближенно заменяются диаграммами с одним виртуальным резононом в промежуточном состоянии. Случай $n=0$ соответствует обмену виртуальным π -мезоном

используем каких-либо модельных представлений и все время остаемся в рамках эксперимента и постулатов, заложенных в основу вывода дисперсионных соотношений [49]. К сожалению, практическая реализация этого подхода дает хорошие результаты лишь при $T \lesssim 10$ Гэв, а при больших энергиях встречается с трудностями: результаты вычислений оказываются сравнительно мало информативными, если для определения коэффициентов c_i используются экспериментальные данные при высоких энергиях (в этом случае мы фактически нормируем теоретическую кривую на экспериментальные точки); если же для определения c_i использовать только область относительно небольших энергий, то вследствие неточности известных экспериментальных значений а экстраполяция в область высоких энергий оказывается весьма не точной.

В настоящее время для вычисления вклада нефизической области предпочтительнее подходы, основанные на дополнительных модельных допущениях. Например, есть основания считать, что взаимодействие двух протонов при нефизических значениях энергии

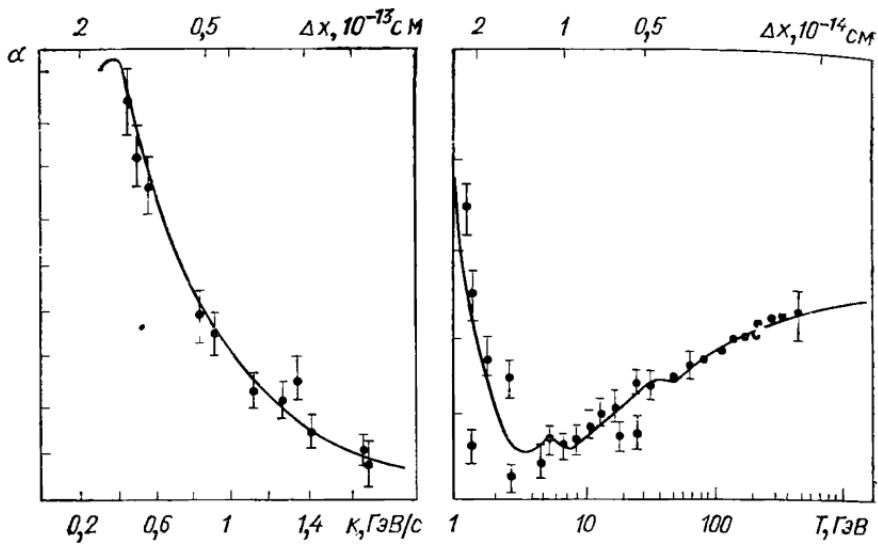


Рис. 18. Значения $\alpha = \text{Re } E/\text{Im } A$ для упругого $(p-p)$ -рассеяния: кривые — теоретический расчет, точки — результаты измерений

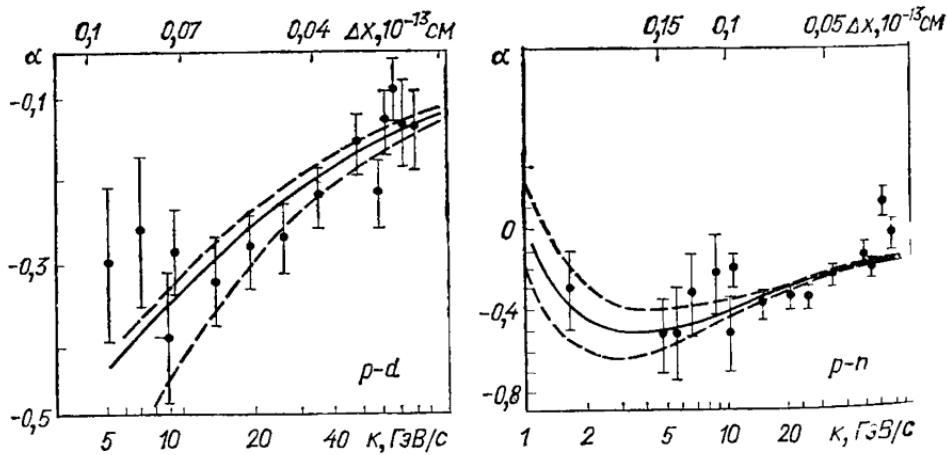


Рис. 19. Отношения действительной и мнимой частей амплитуд упругого $(p-d)$ - и $(p-n)$ -рассеяния $\alpha = \text{Re } A/\text{Im } A$ при различных значениях импульса первичных протонов k : пунктирные и сплошные кривые — расчетные данные различных авторов [54, 55]; точки — результаты измерений

$E < m$ обусловлено в основном обменом определенным числом виртуальных частиц (рис. 17); при этом основной вклад дает обмен самой легкой ядерной частицей — π -мезоном и «резонансные взаимодействия», когда пары и тройки пионов в промежуточном состоянии можно приближенно заменить резононами η , ω , ρ . В этом случае нефизическую часть дисперсионного интеграла, как и в случае упругого $(\pi-p)$ -рассеяния, удается выразить аналитически через константы, характеризующие взаимодействие резононов с нуклоном:

$$\frac{k^2}{4\pi} \int_{\substack{E < m \\ (\text{для } D_{\pm})}} \dots dE' = \sum_n \left(g_n \frac{\mu_n}{2m} \right)^2 \frac{(k/\mu_n)^2}{m - (\mu_n^2/2m) \mp E}, \quad (37)$$

где μ_n — известные из других опытов массы π -мезона ($n=0$) и резононов; g_n — постоянные их связи с нуклоном, которые можно установить путем независимых экспериментов. Полученные таким образом кривые (рис. 18) хорошо согласуются с результатами измерений упругого $(p-p)$ -рассеяния во всей исследованной области значений энергий $T < 400$ ГэВ.

Аналогично можно рассмотреть упругое рассеяние протонов на дейtronах. Теоретические и экспериментальные данные в этом случае также согласуются друг с другом, хотя точность теоретических предсказаний здесь значительно хуже, чем для $(p-p)$ -, а тем более $(\pi-p)$ -рассеяний. Поскольку дейtron представляет собой весьма «рыхлую», слабо связанную систему протона и нейтрона, амплитуду упругого $(p-d)$ -рассеяния можно с хорошей точностью выразить через амплитуды упругого рассеяния протонов на свободных, не связанных протоне и нейтроне. Используя далее известные данные для $(p-p)$ -рассеяния, можно разностным методом получить соответствующие данные для упругого $(p-n)$ -рассеяния. Результаты такого анализа показаны на рис. 19. Они часто обсуждаются в литературе; однако следует иметь в виду, что эти результаты не дают никакой новой по сравнению с $(p-p)$ - и $(p-d)$ -рассеянием информации для проверки дисперсионных соотношений.

Некоторые авторы проводили сравнение дисперсионных соотношений с опытом для рассеяния K -мезонов на протонах. К сожалению, неопределенность расчетов в этом случае еще больше, чем при рассеянии нуклонов на нуклонах, поэтому обнаружить какие-либо расхождения между экспериментом и теорией пока не представляется возможным.

Таким образом, во всей исследованной до настоящего времени области пространственно-временных масштабов $\Delta x \geq 1.5 \cdot 10^{-15}$ см и $\Delta t \geq 5 \cdot 10^{-26}$ сек дисперсионные соотношения, а следовательно, и заложенная в основу их вывода формулировка причинности остаются справедливыми.

§ 13. Асимптотические соотношения

Дисперсионные соотношения служат в настоящее время наилучшим, но не единственным способом проверки условия микропричинности и других постулатов квантовой теории поля. И. Я. Померанчук был первым, кто обратил внимание на то, что эти постулаты приводят к вполне определенным соотношениям между сечениями взаимодействия частиц и античастиц в области значений энергии $T \rightarrow \infty$. Такие соотношения (их принято называть асимптотическими, подчеркивая этим тот факт, что они применимы в области экстремально высоких энергий) можно проверить экспериментально, что представляет собой независимый источник информации о возможном нарушении квантово-полевых постулатов. И. Я. Померанчук показал, что если полные сечения взаимодействия частицы и соответствующей ей античастицы с частицей-мишенью σ_+ и σ_- при увеличении T стремятся к постоянным значениям: $\sigma_+(T) \rightarrow \sigma_+(\infty)$, то из дисперсионных соотношений и дополнительного предположения о том, что радиус сильных ядерных взаимодействий остается ограниченным, следует равенство этих предельных значений: $\sigma_+(\infty) = \sigma_-(\infty)$.

Можно показать, что предположение об ограниченности радиуса взаимодействия эквивалентно условию, чтобы действительная часть амплитуды упругого рассеяния на угол $\theta = 0$ возрастала при $T \rightarrow \infty$ не быстрее, чем первая степень энергии T , а это в свою очередь означает ограниченность асимптотических дифференциальных сечений упругого рассеяния частицы и античастицы в направлении вперед:

$$d\sigma_{el}^{\pm}/dt \leq \text{const}^*.$$

В последующем А. А. Логунову с сотр. удалось доказать асимптотические равенства сечений в более общем виде. Для доказательства этого равенства оказывается вполне достаточно к общим принципам локальной теории поля добавить физически ясное допущение о том, что амплитуды процессов рассеяния не осциллируют, а растут определенным степенным или логарифмическим образом, когда $T \rightarrow \infty$. Это — значительно более мягкое условие, чем использовавшееся в первоначальной работе И. Я. Померанчука требование постоянства сечений взаимодействия при $T \rightarrow \infty$. Одновременно было доказано асимптотическое равенство сечений упругого рассеяния частиц и античастиц и сечений ряда парциальных каналов неупругой реакции.

Экспериментальные данные о сечениях взаимодействия, которыми мы располагали несколько лет назад в области значений

* При анализе опытов в области высоких энергий вместо дифференциального сечения $d\sigma_{el}/d\Omega$ часто используют связанное с ним сечение $d\sigma_{el}(t)/dt = (2\pi/k^2) d\sigma_{el}(0)/d\Omega$, где $t = 2k^2(1 - \cos \theta)$ — так называемый передаваемый импульс; θ — угол рассеяния; k — импульс частицы в системе центра масс. В данном параграфе мы будем иметь в виду сечение $d\sigma_{el}/dt$.

$T \leq 30$ Гэв, казалось бы, подтверждали теорему Померанчука, указывая на постоянство или, по крайней мере, на очень медленное изменение сечений в области $T \geq 10$ Гэв. Одновременно эти данные показывали, что сечения взаимодействия частиц и античастиц сближаются при увеличении энергии [47]. Вместе с тем нельзя было не заметить, что это сближение происходит весьма медленно, особенно в случае K -мезонов: сечения их взаимодействий с протонами становятся очень слабо изменяющимися функциями уже при $T = 1-2$ Гэв, и в то же время во всей исследованной области энергий, вплоть до $T = 20$ Гэв, они различались между собой на 10%, и это различие не обнаруживало сколь-нибудь заметной тенденции к уменьшению. Однако доступный несколько лет назад на ускорителях интервал энергий $T \approx 10-30$ Гэв, где сечения становятся слабо изменяющимися функциями и можно приближенно говорить об «асимптотическом режиме» их поведения, был еще слишком узким для того, чтобы можно было сделать определенные заключения. Ясность внесли последующие опыты на серпуховском ускорителе, которые убедительно показали, что вопреки теореме Померанчука между сечениями взаимодействия частицы и античастицы остаются различия даже при очень высоких энергиях. Более того, изучение группой Н. Л. Григорова сечений взаимодействия космических протонов в области $T \approx 100-1000$ Гэв с помощью спутников и прецизионные измерения сечений взаимодействия сталкивающихся пучков протонов на ускорителе в Женеве для энергий вплоть до $T \approx 1800$ Гэв показали, что сечения $(p-p)$ -взаимодействия вообще не стремятся к постоянному пределу, как это считалось до сих пор, а медленно возрастают, увеличиваясь приблизительно на 10% в интервале $T \approx 100-2000$ Гэв.

Тем не менее обнаруженное на опыте нарушение теоремы Померанчука еще не означает несправедливости заложенных в ее основу постулатов квантовой теории поля, так как при доказательстве этой теоремы были использованы некоторые дополнительные предположения.

Детальный анализ, который выполнен А. А. Логуновым с сотрудниками и рядом других авторов (обзор этих работ см. в статье [56]), показал, что для заключения о нарушении постулатов локальной квантовой теории поля необходимо обнаружить экспериментально при очень высоких энергиях хотя бы один из следующих фактов:

1) асимптотические полные сечения взаимодействия частицы и античастицы не одинаковы: $\sigma_+(\infty) \neq \sigma_-(\infty)$, и в то же время соответствующие дифференциальные сечения упругого рассеяния на угол $\theta = 0$, $d\sigma_{el}^+/dt$ и $d\sigma_{el}^-/dt$, являются ограниченными функциями энергии;

2) одно из сечений σ_+ или σ_- возрастает или уменьшается при увеличении T , а другое — нет;

3) оба полных сечения σ_+ и σ_- возрастают, но их отношение стремится к пределу, не равному единице;

4) одно из сечений σ_+ или σ_- стремится к некоторому небольшому предельному значению, в то время как предельное значение другого сечения экстремально велико;

5) интегральные сечения упругого рассеяния частицы и античастицы σ_{el}^+ и σ_{el}^- уменьшаются с ростом T , а полные сечения взаимодействия стремятся к различным пределам: $\sigma_{el}^+ \rightarrow 0$, $\sigma_+(\infty) \neq \sigma_-(\infty)$;

6) дифференциальные сечения $d\sigma_{el}^+/dt$ и $d\sigma_{el}^-/dt$ в некотором интервале передаваемых импульсов t имеют «гладкое поведение» (например, стремятся к конечным отличным от нуля пределам или изменяются по логарифмическому закону), а их отношение имеет предел, отличный от единицы.

Пока ни один из этих фактов экспериментом не подтвержден.

Принцип причинности остается одним из важнейших принципов современной физики. Говоря словами Планка, принцип причинности — «это путеводитель, и <...> самый ценный путеводитель, каким мы только располагаем, чтобы ориентироваться в пестрой путанице явлений и находить направления, в которых должны идти физические исследования, чтобы они дали плодотворные результаты <...>, он сопровождает исследователя всю жизнь и непрестанно ставит перед ним новые проблемы» [57, с. 268—269].

Изучение конкретных формулировок этого принципа в области очень малых пространственно-временных масштабов позволит получить важные сведения о свойствах пространства и времени и представляет собой в настоящее время одну из актуальнейших задач физического и философского исследований.

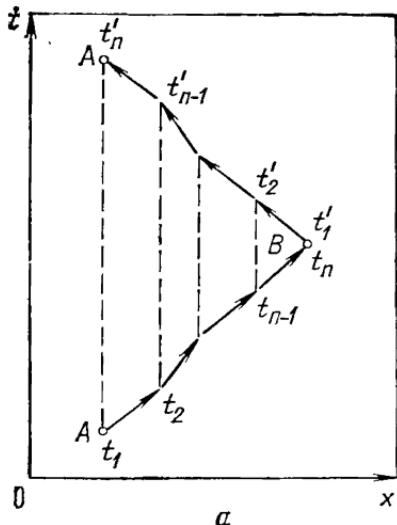
§ 14. Проблема временной необратимости

Хотя некоторые авторы (см. § 7) и согласны с тем, что причинность можно определить безотносительно к категории времени и, во всяком случае, независимо от такого конкретного свойства, как возможность упорядочения временных точек, тем не менее все известные формулировки причинности существенно используют понятие временного порядка событий.

Временная упорядоченность событий $t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n$ является релятивистским инвариантом и во всей доступной изучению области явлений, кроме небольшого числа процессов, связанных со сверхслабыми распадами K -мезонов, нигде не нарушается. Вместе с тем мы можем попытаться реализовать процесс, в котором ранее зафиксированные события будут совершаться в обратной последовательности и система вернется в свое исходное состояние. Возможность такого процесса свидетельствует о времен-

Рис. 20. Временная обратимость процесса перехода системы из состояния *A* в состояние *B*:

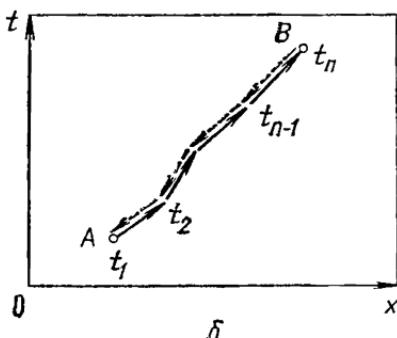
a — с точки зрения постороннего наблюдателя система в следующие друг за другом моменты времени $t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n$ переходит из *A* в *B* и далее путем обратного процесса $t'_1 < t'_2 < \dots < t'_{n-1} < t'_n$, где $t'_1 = t_n$, $t'_2 = t_n + (t_{n-1} - t_1)$, \dots , $t'_{n-1} = t_n + (t_1 - t_1)$, $t'_n = t_n + (t_n - t_1)$, возвращается в исходное состояние *A*. Траектория системы симметрична относительно оси x ; полное время цикла $\Delta t = 2(t_n - t_1)$; *б* — с точки зрения наблюдателя, участвующего в обратном процессе, система в последовательные моменты времени $t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n$ переходит из *A* в *B*, после чего изменяется направление времени, и система в моменты времени $t_n > t_{n-1} > \dots > t_2 > t_1$ возвращается в исходное состояние



ной обратимости рассматриваемых явлений. Хотя для постороннего наблюдателя никакого нарушения временной хронологизации событий при этом не происходит (знак времени не изменяется, рис. 20), однако, если бы такой процесс можно было осуществить в макроскопическом масштабе, то наблюдатель, вовлеченный в этот процесс, интерпретировал бы все явление как «текущее времени вспять».

Фундаментальным свойством окружающего мира является невозможность такой временной обратимости, что представляет собой прямое следствие бесконечно огромного числа многообразных внутренних и внешних связей каждой системы с окружающей ее обстановкой. В этом находит свое выражение одно из самых глубоких и общих свойств движущейся материи — ее неисчерпаемость. Именно это свойство, а не какой-нибудь конкретный времязависимый процесс (хотя такие процессы существуют) является основой необратимости времени.

Вывод о временной необратимости представляется почти очевидным для макроскопических систем и в этом аспекте с различных точек зрения анализировался многими советскими и зарубежными авторами (см., например, работы [12, 40, 58–60], где можно найти подробную библиографию). Значительно менее очевиден этот вывод для элементарных частиц, где законы явно симметричны по отношению к изменению знака времени, а требование T -инвариантности рассматривается как одно из основных положе-



ний современной теории. Например, по мнению Я. П. Терлецкого [60, с. 78], имеются все основания считать «утверждение о неизменяемости временной последовательности причинно обусловленных пространственно разобщенных событий лишь правилом, имеющим макроскопическую природу».

Однако, во-первых, здесь следует еще раз напомнить о том, что причинность в ее философском понимании как глубокой генетической связи между явлениями, обусловленности одних явлений другими, вообще говоря, не обязательно связывать со строгой временной упорядоченностью событий (во всяком случае единой точки зрения на этот вопрос нет*). Во-вторых, нельзя забывать, что наше описание элементарных процессов связано с учетом макроусловий, а это находит свое отражение уже в самом аппарате волновых функций (ср. § 10). Когда при описании элементарных процессов мы отвлекаемся от рассмотрения необходимого сопутствующих необратимых изменений окружающей обстановки, это означает лишь определенную степень идеализации, приближенное выделение важного для нас явления из сложного фона несущественных для данного случая деталей.

Временная симметрия микропроцессов в сущности означает, что наряду с процессом $A \rightarrow B$ во взаимодействиях элементарных частиц равновероятно может осуществляться также и параллельный ему процесс $B \rightarrow A$. Фактически то же самое имеет место и в классической механике. Несмотря на то, что этот раздел физики относится к движению макроскопических тел, его соотношения совершенно симметричны относительно замены $t \rightarrow -t$. Это также объясняется тем, что рассмотрение ограничено лишь несколькими наиболее важными связями, тогда как необратимость времени обусловлена невозможностью воспроизвести в обратном процессе все невообразимо богатое многообразие реализованных связей.

Для макроскопических явлений область действия условия причинности в формулировке, основанной на инвариантности временного порядка событий, практически совпадает с областью действия второго закона термодинамики, а факт необратимости макропроцессов во времени соответствует закону возрастания энтропии. Однако принцип причинности, отражая прежде всего глубинную генетическую связь явлений, не сводится к простому временному упорядочению событий в направлении увеличения энтропии системы. В таком упорядочении отражается всего лишь один из аспектов причинно-следственных связей. Поэтому ни в коей мере нельзя согласиться с теми авторами, которые считают, что принцип причинности «по существу совпадает с представлением о направленности физических процессов во времени» и «является лишь

* Это обстоятельство отмечает также Я. П. Терлецкий. Он подчеркивает, что речь идет о более узком понимании причинности, в основе которого заложено предположение об абсолютном характере временного порядка двух событий [60, с. 76, 77].

интуитивно очевидным выражением второго начала» [60, с. 77, 99]. Такое отождествление, а тем более основанный на этом вывод о неизбежном нарушении причинности в области микроявлений, где происходят флюктуационные нарушения второго начала, неоправданно как с логической, так и с методологической точек зрения.

Как было показано до расстояний, в тысячу раз меньших характерных размеров элементарных частиц, никаких указаний на нарушение причинности не обнаружено, хотя флюктуации с уменьшением энтропии происходят уже на уровне броуновского движения. Вопреки мнению Я. П. Терлецкого, отрицание связи принципа причинности и второго начала термодинамики совсем не означает «попытки ввести некоторый особый физический закон, постулирующий для всех физических процессов определенную и неизменную направленность во времени» [60, с. 78] (хотя такой закон — закон необратимости времени — действительно существует в природе, во всяком случае в интервалах $\Delta x \geq 10^{-16}$ см и $\Delta t \geq 10^{-26}$ сек).

Нельзя также не отметить, что отождествление направления течения времени с изменением энтропии ведет к тому, что течение времени, а следовательно, и само время фактически приобретают статистический характер [12, с. 138]. Лишь не приняв во внимание этого обстоятельства, можно прийти к парадоксальным выводам, подобным, например, тем, что делает Рейхенбах: «Квантовая физика <...> показала, что и временной порядок, а не только направление времени является статистическим свойством. Время представляется всецело макроскопическим явлением, которое нельзя приписать явлениям микрокосмоса. Оно в каждый момент порождается из атомного хаоса в виде статистического соотношения» [58, с. 357].

Выше уже говорилось об открытии нарушения временной симметрии в опытах с распадом K -мезонов. На основе этих экспериментов мы должны допустить возможность существования класса взаимодействий, для которых запрещен ряд процессов, отличающихся от разрешенных простой перестановкой начального и конечного состояний, — аналогично тому, как в слабых взаимодействиях зеркальное отражение пространственных координат x приводит иногда к несуществующему в природе процессу. Мы впервые встречаемся здесь с ситуацией, когда независимо от макроскопической обстановки, казалось бы, можно установить направление «временной стрелы», но, с другой стороны, это направление оказывается зависящим от выбора системы координат (временная четность не сохраняется). Другими словами, подобно тому, как это имеет место с определением правого и левого в слабых взаимодействиях, временной порядок событий и соответственно понятия «раньше» и «позже» теряют смысл. Характерную для элементарных процессов, рассматриваемых независимо от окружающих условий, симметрию между прошлым и будущим можно сохранить лишь при условии одновременного перехода к зеркальной

пространственной системе координат и замены частиц античастицами (*CPT*-инвариантность). Если не прибегнуть к такому дополнительному преобразованию, то требование, чтобы причина предшествовала порождаемому ею следствию, окажется невыполнимым.

К обсуждению этих вопросов мы еще вернемся в гл. 4 в связи с рассмотрением сверхсветовых скоростей сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ленин В. И. Философские тетради. — Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 29.
2. Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. — Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 18.
3. Омельяновский М. Э. Философские вопросы квантовой механики. М., Изд-во АН СССР, 1956.
4. Проблема причинности в современной физике. Сб. статей. М., Изд-во АН СССР, 1960.
5. Бунге М. Причинность Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
6. Свечников Г. А. Причинность и связь состояний в физике. М., «Наука», 1971.
7. Омельяновский М. Э. Диалектика в современной физике. М., «Наука», 1973.
8. Гегель Г. В. Ф. Сочинения. Т. 5. М., Госполитиздат, 1937.
9. Рассел Б. Человеческое познание. Его сфера и границы. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
10. Кузнецов И. В. Принцип причинности и его роль в познании природы. (См. [4]).
11. Уитроу Дж. Естественная философия времени. Пер. с англ. М., «Прогресс», 1964.
12. Аскин Я. Ф. Проблема времени. М., «Мысль», 1966.
13. Аскин Я. Ф. Проблема времени и ее философское истолкование. Автореф-рат дисс. на соиск. ученой степени докт. филос. наук. Свердловск, СГУ, 1966.
14. Алексеев И. С. Пространство, время, структура. — В кн.: Философия и фи-зики. Воронеж, ВГУ, 1972.
15. Чудинов Э. М. Теория относительности и философия. М., Политиздат, 1974.
16. Reichenbach H. The philosophy of space and time. New York, Inc., 1958.
17. Мостепаненко А. М., Мостепаненко М. В. Четырехмерность пространства и времени. М., «Наука», 1966.
18. Лаплас Р. Опыт философии теории вероятностей. Пер. с франц. М., Т-во И. Н. Кушнерева и К°, 1908.
19. Свечников Г. А. Причинность и связь состояний в микропроцессорах. — Воп-росы философии, 1959, т. 6, с. 155.
20. Барашенков В. С. О возможностях построения релятивистской инвариантной теории протяженных частиц. — «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1957, т. 32, с. 566.
21. Markov M. A. Das Mehrkörperproblem in der klassischen relativistischen Theorie. — «J. Phys.», 1943, v. 7, p. 42.
22. Сачков Ю. В. Введение в вероятностный мир. М., «Наука», 1971.
23. Крылов Н. С. Работы по обоснованию статистической физики. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950.
24. Heisenberg W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kine-matik und Mechanik. — «Z. Phys.», 1927, Bd. 43, S. 172.
25. Heisenberg W. In: Universitas, 1954, Hf. 3, S. 225.
26. Дирак П. А. М. Основы квантовой механики. Пер. с англ. М., ГИТТЛ, 1937.

27. Гейзенберг В. Физика и философия. Пер. с нем. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
28. Bloch F. Die physicalische Bedeutung mehrerer Zeiten in der Quantumelectrodynamik. — «Phys. Z. der Sowjetunion», Bd 5, S. 301, 1934.
29. Dirac P. A. M., Fock V. A., Podolsky B. On quantum electrodynamics. — «Phys. Z. der Sowjetunion», 1932, Bd 2, S. 468.
30. Tomonaga S. On a relativistically invariant formulation of the quantum theory of wave fields. — Progr. Theor. Phys., 1946, v. 1, p. 27.
Пер. в сб.: Новейшее развитие квантовой электродинамики.
Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1954, с. 1.
31. Schwinger J. Quantum electrodynamics. — «Phys. Rev.», 1948, v. 74, p. 1439.
Пер. в сб.: Новейшее развитие квантовой электродинамики.
Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1954, с. 12.
32. Швебер С. Введение в релятивистскую квантовую теорию. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
33. Рамакришнан А. Элементарные частицы и космические лучи. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
34. Блохинцев Д. И. Пространство и время в микромире. М., «Наука», 1970.
35. Fierz M. Über die Bedeutung der Funktion D_C in der Quantentheorie der Wellenfelder. — «Helv. Phys. acta», 1950, v. 23, p. 731.
Пер. в сб.: Новейшее развитие квантовой электродинамики. М., Изд-во иностр. лит., 1954, с. 239.
36. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М., ГИТТЛ, 1957.
37. Heisenberg W. Die «beobachtbaren Größen» in der Theorie der Elementarteilchen. — «Z. Phys.», Bd 120, S. 513, 1943.
38. Heisenberg W. Die beobachtbaren Größen in der Theorie der Elementarteilchen, II. — «Z. Phys.», Bd 120, S. 673, 1943.
39. Терлецкий Я. П. Динамические и статистические законы физики. М., МГУ, 1950.
40. Терлецкий Я. П. К вопросу о пространственной структуре элементарных частиц. — В кн.: Философские проблемы физики элементарных частиц. М., Изд-во АН СССР, 1963.
41. Фок В. А. Квантовая физика и строение материи. Л., ЛГУ, 1965.
42. Барашенков В. С. Отрицание отрицания в квантовой теории. — «Вопросы философии», 1966, № 5, с. 93.
43. Микишев Г. Я. Динамические и статистические закономерности в физике. М., «Наука», 1973.
44. Винер Н. Я — математик. М., «Наука», 1964.
45. Блохинцев Д. И. Принципиальные вопросы квантовой механики. М., «Наука», 1966.
46. Урсул А. Д. Природа информации. М., Госполитиздат, 1968.
47. Барашенков В. С. Сечения взаимодействия элементарных частиц. М., «Наука», 1966.
48. Russel B. On the notion of cause. — In: Feiglbrodback readings in philosophy of science. New York, Inc., 1953.
49. Barashenkov V. S. Dispersion analysis of elastic scattering of high energy particles. — Fortschr. Phys., 1966, Bd 14, S. 741.
50. Dumbrais O. V. A complication of Data on the real parts of the $\pi^\pm - p$ forward scattering amplitudes. Communication JINR E1-5847. Dubna, 1971.
51. Hendric R. E., Laustrup B. Real parts of the forward elastic $\pi^\pm p$, $K^\pm p$, $\bar{p}p$ and pp scattering amplitudes from 1 to 200 GeV/c. «Phys. Rev. D», 1975, v. 11, p. 529.
52. Lindenbaum S. J. Interactions of pions and nucleons above 1 GeV/c. — In: Proc. of the 12th intern. conf. on high energy physics. Dubna, 1964, p. 164.
53. Small-Angle elastic pion-nucleon scattering at high energies and the real part of the scattering amplitude. — Phys. Rev. Lett., 1965, v. 14, p. 862, Auth.: K. J. Foley e. a.

54. **Вернов Ю. С.** Отношение вещественной и мнимой частей амплитуды pd -рассеяний.— «Ядерная физика», 1966, т. 3, с. 877.
55. **Carter A. A., Bugg D. V.** The real part of the proton-neutron forward scattering amplitude.— «Phys. Lett.», 1966, v. 20, p. 208.
56. **Nguen Van Hieu.** Analytic properties of the amplitudes and asymptotic theorems.— In: Proc. of the 15th intern. conf. on High energy physics. Kiev, 1972, p. 564.
57. **Plank M.** Die Kausalität in der Natur.— In: Vorträge und Erinnerungen. Aufgabe 5, Stuttgart.
58. **Рейхенбах Г.** Направление времени. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
59. **Омельяновский М. Э.** Послесловие к кн.: Рейхенбах Г. (см. [58]).
60. **Терлецкий Я. П.** Парадоксы теории относительности. М., «Наука», 1966.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СИММЕТРИЯ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Тот факт, что все точки пространства и времени абсолютно равноправны, а свойства пространства совершенно не зависят от выбора направления, в нашей обычной практике представляется вполне очевидным. Вместе с тем после создания общей теории относительности мы привыкли к мысли о том, что в космических масштабах в зависимости от распределения вещества, определяющего свойства пространства и времени, они могут быть неоднородными, а пространство, кроме того, может обладать еще и свойством анизотропии, т. е. быть в определенном смысле похожим на кристалл. Это может иметь место как в сравнительно «небольших» галактических и даже звездных масштабах, так, в принципе, и для всей наблюдаемой Вселенной (хотя известные сейчас данные астрономических и астрофизических наблюдений свидетельствуют скорее об однородности и изотропии нашего Мира; подробнее см. об этом, например, [1, 2]).

Открытие несимметричности физических законов по отношению к правому и левому при слабых взаимодействиях и невозможность однозначно различить прошлое и будущее в процессах распада K -мезонов убедили нас в том, что микроскопические пространство и время могут обладать самыми необычными и неожиданными свойствами. В свете этих фактов обнаружение на опыте отклонений от однородности и изотропии микроскопического пространства — времени, не связанных с гравитационными явлениями, не будет для нас чем-то из ряда вон выходящим.

С чисто физической точки зрения возможность нарушения свойств изотропии и однородности пространства — времени как в очень больших космических, так и в ультрамалых субатомных масштабах не вызывает каких-либо принципиальных возражений. Естественной представляется также необходимость соответствующей экспериментальной проверки.

Однако существует и другой аспект проблемы. Еще более полувека назад Нетер показала, что инвариантность физических явлений по отношению к пространственно-временным сдвигам и вращению в трехмерном пространстве тесно связана с законами сохранения энергии — импульса и углового момента. Возможность же нарушения этих законов, особенно закона сохранения энергии,

часто рассматривается как нечто совершенно недопустимое, чу́ть ли не противоречащее основным положениям диалектического материализма о несоставимости и неуничтожимости материи и движения. Так ли это? Действительно ли эти законы сохранения, в частности закон сохранения энергии, должны выполняться на всех без исключения уровнях организации материи? И вообще — мыслимы ли формы движения материи, которые не обладают энергией?

Вопросам, связанным с законами сохранения и различными типами симметрий, в последнее десятилетие в физике уделялось особое внимание в надежде выявить какие-то общие симметрии в свойствах быстро возрастающего семейства элементарных частиц и с их помощью построить «периодическую систему» частиц и их взаимодействий. В этом направлении были выполнены сотни экспериментальных и теоретических работ, где детально исследовались как уже известные типы симметрий, так и новые группы преобразований, с изучением которых связаны такие выдающиеся достижения, как предсказание и последующее открытие в экспериментах новых типов элементарных частиц, глубокая разработка проблем их систематики, новый подход к обоснованию гравитационных уравнений Эйнштейна и т. д. (см., например, монографии [3—5], где указана подробная библиография). Идеи, положенные в основу этих работ, затрагивают важные методологические проблемы и, несомненно, окажут еще большее влияние на дальнейшее развитие физики. Говоря словами Вигнера [6], по сравнению с эмпирическими закономерностями и их теоретическими обобщениями в рамках определенных модельных подходов свойства симметрии и соответствующие им законы сохранения определяют третий, значительно более высокий уровень понимания явлений природы.

Философские аспекты законов сохранения обсуждали многие авторы. Кроме уже упомянутых работ Вигнера [6] здесь следует отметить работы Н. Ф. Овчинникова, В. С. Готта, А. М. Мостепаненко и других ученых [7—15] (в них можно найти более подробную библиографию), в которых дан анализ проблемы и получены интересные выводы.

Вместе с тем в литературе широкое распространение получили утверждения, с которыми нельзя согласиться. Так, большие сомнения вызывают положения о применимости хотя бы некоторых законов сохранения «по всему бесконечному миру», в частности весьма категорические высказывания об универсальном характере закона сохранения и «абсолютной всеобщности» энергии и т. д.

Для дальнейшего развития физической теории очень важно выяснить, являются ли эти утверждения действительно надежно установленными результатами или же представляют собой лишь смелую экстраполяцию известных сейчас законов на не исследованные еще области ультрамалых и ультрабольших пространственно-временных интервалов. Понятно, что то или иное решение этого фи-

лософского вопроса физиком существенно скажется на характере его конкретных физических исследований.

Уточнения требует также смысл утверждения о «несохранении» объективно существующих свойств материи и движения в тех случаях, когда «нарушается» соответствующий закон сохранения. Действительно ли можно утверждать, как это делает, например, В. Н. Веселовский [15, с. 41], что смысл нарушения законов сохранения заключается лишь в том, что эти свойства при определенных условиях просто никак не проявляются, а на самом деле имеет место некоторый всеобщий «принцип сохранения»? Этим и другим относящимся к ним вопросам посвящена данная глава.

Прежде всего мы рассмотрим, насколько «жесткой» является связь законов сохранения со свойствами инвариантности и теоремой Нетер; далее коснемся соотношения между так называемыми «всеобщими» и «частными» законами сохранения, подробно разберем специфические изменения классических законов сохранения энергии, импульса и момента в области квантовых явлений и, наконец, — экспериментальную проверку этих законов и связанных с ними свойств изотропии и однородности микроскопического пространства — времени.

§ 15. Свойства симметрии и законы сохранения

Любая структура обладает свойствами симметрии, т. е. регулярным повторением некоторых своих характеристик и качеств. Этой симметрии соответствует определенная система инвариантов — законов сохранения, как принято называть их в физике. В частности, согласно знаменитой теореме Нетер [16], каждой N -параметрической группе преобразований, оставляющей инвариантную функцию действия $S = \int \mathcal{L} d^4x$, соответствует N линейно независимых законов сохранения

$$dI_n/dt = 0, \quad n=1, \dots, N. \quad (38)$$

Теорема Нетер устанавливает фундаментальную связь величин, характеризующих движение материальных объектов в пространстве и времени, со свойствами самого пространства — времени. По отношению к протекающим физическим событиям эти свойства выступают здесь как первичные, определяющие.

Обратной теоремы, согласно которой любому закону сохранения соответствовала бы группа преобразований, оставляющая инвариантную функцию действия S , вообще говоря, не существует. Такая теорема имеет место лишь в частном случае — для так называемых невырожденных лагранжианов \mathcal{L} , когда среди уравнений движения нет уравнений первого порядка, и при условии, что преобразование не изменяет уравнений движения. В противном случае число законов сохранения может превосходить число преоб-

разований, оставляющих инвариантной функцию S (т. е. будет большим, чем N ; см. [17]).

Например, для уравнения Дирака с нулевой массой, которое является уравнением первого порядка и поэтому не удовлетворяет условиям «обратной теоремы», не зависящим от времени интегралом движения, является величина

$$I_\varphi = \int \{\bar{\Psi}(x) \gamma_4 \varphi(x) - \bar{\varphi}(x) \gamma_4 \Psi(x)\} d^3x, \quad (39)$$

где $\varphi(x)$ — некоторое частное решение уравнения Дирака*. Поскольку таких решений бесконечно много, число различных законов сохранения $dI_\varphi/dt=0$ также бесконечно велико. В то же время число преобразований, оставляющих инвариантную функцию действия, конечно и весьма невелико.

Как мы увидим, каждому интегралу движения отвечает преобразование, по отношению к которому уравнения движения инвариантны. Н. Х. Ибрагимов показал [17], что интегралам движения (39) соответствует бесконечно большое число линейно независимых преобразований

$$\Psi'(x) = \Psi(x) + a\varphi(x); \quad \bar{\Psi}'(x) = \bar{\Psi}(x) + \bar{a}\varphi(x)$$

(a — произвольное действительное число), каждое из которых оставляет инвариантным уравнение Дирака, но изменяет функцию действия S . Можно привести еще ряд подобных примеров.

Отсутствие обратной теоремы Нетер иногда истолковывают как доказательство того, что именно свойства симметрии, в частности симметрия пространства и времени, лежат в основе законов сохранения, а не наоборот, как это можно было бы ожидать, основываясь на философском положении о том, что пространство и время представляют собой лишь форму существования материи и поэтому должны в существенной степени определяться закономерностями движения материальных объектов, в частности законами сохранения, которые «выражают субстанциональность, неуничтожимость и несоздаваемость материи и движения» [7, с. 177]. Однако, если прямая теорема Нетер устанавливает непосредственную связь симметрии и закона сохранения, то в рассмотренной обратной теореме речь идет лишь об установлении связи между законом сохранения и *инвариантностью функции действия* по отношению к определенной группе преобразований. Такой инвариантности S в действительности может и не быть, но это не исключает того, что *каждому* закону сохранения независимо от

* В соответствии с общепринятыми обозначениями мы положили $\bar{\Psi} = \Psi^+ \gamma_4$, где крестиком отмечено эрмитовское сопряжение; а γ_4 — известная четырехрядная матрица Дирака. В том, что $dI_\varphi/dt=0$, легко убедиться, если воспользоваться уравнением Дирака и преобразовать с помощью известной теоремы Гаусса объемный интеграл в интеграл по бесконечно удаленной поверхности, где функции φ и Ψ обращаются в нуль.

свойств функции S отвечают вполне определенная группа преобразований и соответствующая симметрия.

В том, что это так, можно убедиться, рассмотрев действие на уравнение Шредингера

$$i\hbar\partial\psi/\partial t = \hat{H}\psi$$

оператора $G = \exp(i\alpha I)$, где α — произвольное действительное число, а I — квантовомеханический оператор сохраняющейся величины I . Поскольку

$$\partial\hat{G}/\partial t \sim \partial I/\partial t = 0, \quad (40)$$

а оператор I коммутирует с гамильтонианом H^* , то преобразованное уравнение Шредингера можно записать в виде

$$i\hbar(\partial/\partial t)(\hat{G}\psi) = \hat{H}(\hat{G}\psi),$$

откуда следует, что волновая функция $\psi' = \hat{G}\psi$ является решением того же уравнения, что и непреобразованная функция ψ ; другими словами, система обладает симметрией по отношению к группе преобразований G^{**} .

Для того чтобы сделать более наглядным физический смысл этого преобразования, волновую функцию ψ следует разложить по собственным функциям оператора I и рассмотреть действие преобразования G на эти функции. Например, преобразование, соответствующее сохранению импульса, сводится к замене пространственной координаты x координатой $x+a$, т. е. тождественно-пространственному сдвигу:

$$\begin{aligned} \psi'(x, t) &= \hat{G}\psi(x, t) = \exp(i\alpha\hat{p})\psi(x, t) = \\ &= \exp[i\alpha(-i\hbar\partial/\partial x)] \sum_q c_q(t) \exp(iq\hbar x) = \\ &= \sum_q c_q(t) \exp(iq\hbar x) \exp(iq\hbar x) = \psi(x+a, t). \end{aligned}$$

Аналогично, преобразование

$$\hat{G} = \exp(-i\hbar\alpha\partial/\partial t) \quad (41)$$

означает сдвиг времени:

$$\psi'(x, t) = \hat{G}\psi(x, t) = \psi(x, t+\alpha).$$

* Это является прямым следствием определения временной производной квантовомеханического оператора:

$$[\hat{I}, \hat{H}] = i\hbar\partial\hat{I}/\partial t = 0.$$

* Это утверждение можно доказать и в значительно более общем виде — на языке матрицы рассеяния, без какого-либо использования лагранжиана или гамильтониана.

Несколько более сложно доказывается, что преобразование, соответствующее сохранению момента M , представляет собой пространственное вращение и т. д.

Мы видим, что каждому типу симметрии соответствует свой закон сохранения и, наоборот, каждому закону сохранения может быть сопоставлена вполне определенная симметрия. В рамках современных физических теорий нельзя установить, что является более фундаментальным — симметрия или же неразрывно связанный с ней закон сохранения.

С философской точки зрения, как это отмечалось выше, можно было бы думать, что определяющими должны быть законы сохранения. Однако такой подход также представляется несколько упрощенным и односторонним, поскольку свойства симметрии (конкретно мы имеем сейчас в виду симметрию пространства и времени) могут, в принципе, определяться какими-то весьма глубокими свойствами специфических материальных процессов, непосредственно не связанными с законами сохранения, а последние будут проявляться уже как обратное «упорядочивающее» влияние формы на содержание. Соотношение законов сохранения и свойств симметрии скорее представляет собой сложную взаимосвязь, чем простую «линейную» связь, при которой одна сторона отношения полностью определяет другую*.

Можно сказать, что законы сохранения и свойства симметрии выражают два взаимосвязанных аспекта того объективного факта, что материя и ее движение не могут исчезать бесследно или возникать из ничего. Тем более недопустимы встречающееся иногда в литературе утверждение о том, что свойства симметрии являются следствием законов сохранения (или наоборот). Понятие причинной связи здесь совершенно неприменимо.

Кроме величин, сохранение которых непосредственно связано с различными типами пространственно-временных симметрий, в физике имеются величины (например, электрический заряд, странность, барионное число и т. д.), законы сохранения которых с первого взгляда представляются совершенно несвязанными с пространственно-временными координатами x , t . Однако исследования, выполненные в последние годы, показали, что это не совсем так. Последовательная формулировка таких законов, совместимая с требованием причинности и другими общими принципами современной физической теории, обязательно требует учета переменных x и t . Более того, оказалось, что учет пространственно-временных переменных сразу же приводит к предсказанию существования полей, о которых можно сказать, что они «динамически реализуют законы сохранения».

* С этой точки зрения представляется весьма спорным и односторонним утверждение Ю. П. Румера и Н. Ф. Овчинникова о том, что «следует перевернуть традиционное понимание и сказать, что свойства однородности пространства — времени вытекают из законов сохранения энергии и импульса» [18, с. 85].

Первым толчком в этом направлении послужила работа Янга и Миллса, в которой было показано, что требование локальной (т. е. зависящей от «четырехмерной» точки x) инвариантности по отношению к преобразованию фазы волновой функции в изотопическом пространстве

$$\psi'(x) = \exp[ia(x)\hat{I}]\psi(x), \quad (42)$$

соответствующее закону сохранения изотопического спина I (физически это требование означает возможность независимо выбирать ориентацию оси изотопического спина в любой точке пространства и времени), может быть обеспечено лишь в том случае, если допустить существование некоторого нового векторного поля. Позднее Сакураи распространил этот вывод на законы сохранения барионного заряда и странности.

Основную идею, положенную в основу этих важных выводов, легче всего понять на примере уравнения Шредингера с электромагнитным полем. Представляет интерес рассмотреть этот пример несколько подробнее, так как он особенно ярко иллюстрирует все более четко проявляющуюся в настоящее время тенденцию глубокого взаимопроникновения физического и философского аспектов исследования природы микромира.

В квантовой теории непосредственный физический смысл имеет не сама волновая функция ψ , а квадрат ее модуля — вероятность $|\psi|^2$, поэтому все соотношения теории должны оставаться инвариантными при изменении фазы

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = \psi(x) \exp(i\alpha), \quad (43)$$

где α — произвольное действительное число. Однако такое преобразование (так называемое преобразование калибровки первого рода), означающее одновременное (мгновенное) изменение фазы во всех точках бесконечной Вселенной, совершенно неудовлетворительно с методологической точки зрения: ни одна физическая теория не может претендовать на описание явлений в области сколь угодно больших и сколь угодно малых пространственно-временных интервалов, поэтому последовательная формулировка теории должна исключать такие масштабы. Кроме того, одновременное изменение фазы сразу во всех точках пространства по своему характеру близко к акаузальному принципу дальнодействия, так как любая попытка физической проверки осуществимости такой операции потребовала бы сверхсветовых скоростей сигналов.

Из этих общих соображений следует, что преобразование (43) должно относиться лишь к отдельным пространственным точкам, т. е. $\alpha = \alpha(x)$. Однако в уравнении Шредингера для преобразованной функции $\psi'(x)$ при этом возникает отличный от нуля дополнительный член, зависящий от производной $d\alpha/dx_\mu$, и инвариантность теории непоправимо нарушается. Устранить этот член можно лишь введением в уравнение Шредингера некоторой новой вели-

чины, поля $A_\mu(x)$, изменение которой при калибровочном преобразовании в свою очередь давало бы дополнительный член, компенсирующий ранее упомянутый:

$$A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x) - (1/e) \partial \alpha(x) / \partial x_\mu. \quad (44)$$

По теореме Нетер такое калибровочное преобразование соответствует закону сохранения электрического заряда — постоянной, определяющей взаимодействие поля A_μ .

Таким образом, требование инвариантности теории по отношению к локальному преобразованию (43) приводит к *предсказанию* существования электромагнитного поля A_μ . [Условие (44) совпадает с известным условием Лоренца].

Сходным образом обосновывается локальность калибровочных преобразований, связанных с тремя другими сохраняющимися квантовыми числами — ее изоспином, странностью и барронным числом. При этом предсказывается существование трех новых полей, каждое из которых, подобно рассмотренному выше полю A_μ , необходимо для обеспечения калибровочной инвариантности теории. Экспериментальные исследования на ускорителях подтвердили существование таких полей*. Более того, оказалось, что применение требования локальности к преобразованиям Лоренца автоматически приводит к уравнениям гравитационного поля Эйнштейна, которое в данном случае также выступает как некоторое «компенсирующее поле» [4]. Это был выдающийся успех теории.

Существенно, что обусловившее этот успех требование локальной инвариантности теории, как это видно из приведенных выше рассуждений, имеет в сущности методологический характер. Физика и философия здесь оказываются практически неразделимыми.

§ 16. «Всеобщие» и «частные» законы сохранения

При определенных условиях практически любая физическая величина может стать сохраняющейся, т. е. удовлетворять некоторому закону сохранения. Например, скорость тела остается постоянной при равномерном движении и в ряде упругих процессов, механическую массу тела с высокой степенью точности можно считать сохраняющейся при небольших скоростях движения и т. д. Даже такая «типично динамическая» величина, как ускорение, является интегралом движения, происходящего под действием постоянной

* Обнаруженные в экспериментах частицы имеют отличные от нуля массы, а калибровочная инвариантность выполняется лишь для безмассовых частиц (подобных фотону). Противоречие удалось устранить более детальным учетом вакуумных полей, которые приводят к тому, что «калибровочные» частицы «обрастают» массой. Подробнее об этом говорится в обзорах [4, 19].

сили. Однако условия, при которых все эти величины сохраняются, весьма специфичны, а области применимости соответствующих законов сохранения очень ограничены.

Иногда для того чтобы выделить более общие законы сохранения, в качестве основного объективного признака, характеризующего сохраняющиеся величины, рассматривают их сохранение в процессах взаимодействия. Каждая такая величина «сохраняется не только как свойство отдельного тела, но и как характеристика процесса, в котором участвуют два или множество материальных объектов» [15, с. 32]. Но такое определение является слишком широким, так как, например, равноускоренное движение происходит как раз при наличии взаимодействия, под действием силы. Можно привести еще много примеров, которые подходят под указанное определение.

В настоящее время в особую группу законов сохранения принято выделять лишь те из них, которые применимы для любых сильных, электромагнитных, слабых или гравитационных взаимодействий. Таких законов сохранения в настоящее время насчитывается свыше пятнадцати. Часть из них, например законы сохранения энергии, импульса, углового момента, электрического заряда, барионного числа, применима ко всем четырем типам взаимодействий, другие имеют более ограниченную область действия. Так, закон сохранения изотопического спина не выполняется, когда становятся существенными электромагнитные силы; странность, пространственная четность, инвариантность процессов по отношению к замене частиц античастицами не сохраняются в слабых взаимодействиях и т. д. Недавно в связи с опытами по распадам K -мезонов в физику был введен еще один тип взаимодействия — сверхслабое взаимодействие, которое нарушает не только пространственную и зарядовую инвариантность, но и симметрию по отношению к изменению знака времени. Однако каждый из законов сохранения обладает универсальностью по крайней мере по отношению к одному из указанных типов фундаментальных взаимодействий. Существенно, что при таком определении устанавливается взаимосвязь, а не односторонняя зависимость законов сохранения от типа взаимодействия. Установление этой взаимосвязи имеет в настоящее время несомненное эвристическое значение.

Как было только что отмечено, известные нам законы сохранения разделяются на две группы: законы сохранения с ограниченной областью действия и законы, для которых сейчас неизвестно никаких ограничений. Таких законов большинство. Для физика очень важно знать, является ли неограниченная область действия этих законов исторически условной и с дальнейшим развитием наших знаний, возможно, будет сведена к некоторой частной группе взаимодействий, будет ограничена какой-то вполне определенной конечной областью пространства — времени $r < x < R$ и $\tau < t < T$, или же хотя бы некоторые законы (например, закон со-

хранения энергии) применимы на любом уровне организации материи. Как совершенно правильно подчеркивают В. С. Готт и А. Ф. Перетурий [11], постановка вопроса о том, насколько обоснована «всеобщность» известных нам сейчас законов сохранения, является далеко не абстрактной, а имеет глубокие основания в той ситуации, которая сложилась в настоящее время в физике.

В философской литературе в настоящее время нет единого мнения по этому вопросу. В ряде работ высказываются утверждения об абсолютной всеобщности части законов сохранения и в первую очередь закона сохранения энергии. Так, в монографии В. Н. Веселовского [15, с. 18] утверждается, что «энергия — такая природная величина, которая характеризует любую форму движущейся материи, любой ее уровень. Она обладает абсолютной всеобщностью». Аналогичной точки зрения придерживаются В. С. Готт и А. Ф. Перетурий, которые считают, что везде «где имеют место физические взаимодействия, имеет место и закон сохранения и превращения энергии» [11, с. 85].

Другие авторы придерживаются иного мнения (см., например, статью А. В. Самускевича [20, с. 64], а также сборник [21, с. 219]).

Иногда даже в одной и той же книге содержатся совершенно противоположные высказывания. Так, в статье С. В. Измайлова, включенной в сборник [22], говорится о том, что «законы сохранения энергии, импульса и момента импульсов должны иметь место для всех видов материи — открытых или неоткрытых» (с. 87), а в статье М. В. Мостепаненко в этом же сборнике допускается принципиальная возможность существования «таких, еще не открытых нами объектов неживой природы, которые вообще не обладают энергией» (с. 157). Более того, даже в работах одного и того же автора иногда встречаются утверждения, которые можно понять в совершенно противоположном смысле. Например, в известных работах Н. Ф. Овчинникова [7, с. 165; 8, с. 85] указано, что «с открытием принципа сохранения энергии в теоретическую систему физики вошел закон с максимальной степенью общности». Однако в другой статье Н. Ф. Овчинникова [23, с. 75] подчеркивается, что «любой из принципов сохранения, принадлежащий к классу общих законов, может обнаружить ограниченность сферы своего действия».

Убеждение в ограниченности области действия всех законов сохранения основано в конечном счете на том соображении, что по мере того, как мы переходим к исследованию все более малых и, наоборот, очень больших пространственно-временных интервалов, происходят глубокие качественные изменения форм материи и связанных с ней явлений, и трудно ожидать, чтобы при этом сохранились закономерности, полученные из анализа реальности на сравнительно немногих известных сейчас уровнях материи. Исторически развитие науки до сих пор происходило так, что законы сохранения, первоначально казавшиеся до очевидности абсо-

лютыми и незыблемыми, в последующем оказывались приближенными, применимыми лишь в определенной ограниченной области. Так было, в частности, с законом сохранения механической массы. В то время, когда не была еще открыта электродинамика, допустить принципиальную возможность нарушения этого закона многим физикам и философам представлялось равносильным допустить бесследное исчезновение или возникновение вещества из ничего. Именно этим был обусловлен кризис физики на рубеже XIX—XX вв. Также двадцать лет назад многим казалось вполне очевидным, что во всей окружающей нас природе должна выполняться право-левая симметрия и соответственно закон сохранения пространственной четности должен быть «абсолютным законом». В настоящее же время ограниченность этого закона хорошо установлена; более того, установлено нарушение не только пространственной, но и временной четности.

Из анализа возражений, выдвигаемых против ограниченной области действия законов сохранения, видно, что, как правило, в их основе лежит явное или неявное опасение, что нарушение законов сохранения в какой-то степени может противоречить основным положениям диалектического материализма о несotворимости и неуничтожимости материи и движения. Однако для таких опасений нет никаких оснований. Признание ограниченной области действия известных нам сейчас физических законов сохранения совершенно не противоречит положениям диалектического материализма. Единственное свойство материи, с признанием которого связан диалектический материализм, это — свойство материи быть объективной реальностью. Понимаемая как предельно широкий образ такой реальности, материя не может обладать каким-либо конкретным абсолютным качеством, а поэтому не может иметь и абсолютной количественной меры, которая была бы свойственна всем уровням ее организации. В этом проявляется неисчерпаемость материи, реализующейся в бесконечном числе форм, видов и соответствующих им количественных и качественных мер, каждая из которых по необходимости преходяща и ограничена.

Следует различать философский принцип несotворимости и неуничтожимости материи, выражający невозможность ее перехода во что-то нематериальное, и конкретные законы сохранения, в которых проявляется относительная устойчивость определенных свойств движущейся материи.

Наоборот, точка зрения, согласно которой часть известных в настоящее время законов сохранения обязательно должна действовать на всех без исключения уровнях организации материи, представляется весьма ограниченной. Нельзя не согласиться с В. И. Свидерским, когда он подчеркивает, что «абсолютизация любых конкретных состояний и свойств материи всегда приводит к метафизике» [24, с. 17]. Последнее в полной мере относится и к законам сохранения энергии, импульса и углового момента. Величины, о которых идет речь в этих законах, вполне конкретны,

ограничены по своей применимости физическими, а не философскими категориями.

Рассмотрим подробнее аргументы, наиболее часто приводимые для доказательства «абсолютной всеобщности» закона сохранения энергии.

§ 17. Является ли энергия величиной, характеризующей движение на любом уровне материи?

Понятно, что об абсолютной всеобщности и универсальности закона сохранения энергии можно говорить лишь в том случае, если сама энергия имеет смысл на любом уровне организации материи. Обычно в подтверждение этому приводят следующие соображения. Энергия системы определяется работой, которую эта система может произвести. В свою очередь, работа в самом общем виде представляет собой «изменение формы движения, рассматриваемое с его количественной стороны» [25, с. 419], а поскольку мы не можем отрицать возможности изменений и взаимопревращений различных форм движения на любом уровне материи, то «можно с уверенностью сказать, что, как бы глубоко в тайны материи ни проникало человеческое познание, какие бы диковинные формы движущейся материи ни были открыты, они обязательно будут обладать энергией <...>. Энергия есть везде, где есть движение» [15, с. 18].

Сходное утверждение содержится в уже цитированной выше статье В. С. Готта и А. Ф. Перетурина [11, с. 85]: «В силу всеобщности преобразований и переносов материального движения всеобщностью обладает и закон сохранения и превращения энергии». Эти авторы считают, что поскольку превращения и переносы материального движения составляют основу физических взаимодействий, то везде, где имеют место физические взаимодействия, существует понятие энергии и действует закон ее сохранения.

Однако все эти соображения, на наш взгляд, небезупречны с точки зрения логики, и с ними нельзя согласиться. Приведенное выше положение Ф. Энгельса действительно можно рассматривать как охватывающее все виды работы как известные, так и те, которые нам предстоит еще открыть; вместе с тем это положение нельзя рассматривать как определение работы, так как количественное изменение формы движения характеризуется не только работой, но и многими другими величинами, например вероятностью такого изменения. Поэтому высказывание Ф. Энгельса не противоречит тому, что существуют какие-то пока еще не известные нам материальные объекты, для которых работа, а следовательно, и энергия просто не имеют смысла; перенос и трансформации видов движения в этих объектах будут характеризоваться какими-то другими величинами. Исключить возможность открытия таких объектов нельзя.

По В. И. Ленину, это означает, что «исчезает тот предел, до которого мы знали материю до сих пор, наше знание идет глубже; исчезают такие свойства материи, которые казались раньше абсолютными, неизменными, первоначальными <...> и которые теперь обнаруживаются, как относительные, присущие только некоторым состояниям материи» [26, с. 275].

Н. Ф. Овчинников предполагает определить энергию как «меру движения вообще», как «меру общего в движении, меру той сохраняющейся основы, которая не исчезает в движении материи, какую бы форму это движение не принимало» [7, с. 164; 8, с. 83]. Однако, как отмечалось в предыдущем разделе, единственным абсолютным свойством движущейся материи является ее свойство быть объективной реальностью; допущение какой-нибудь другой «основы, не исчезающей в движении материи», а тем более определенной меры этой основы — это всего лишь *предположение*, абсолютизирующее известное нам конкретное свойство материи. Исходя из общих положений диалектического материализма, можно с уверенностью утверждать, что такой «общей неустранимой основы» быть не может. «Признание каких-либо неизменных элементов, «неприменимой сущности вещей» и т. п., — подчеркивал В. И. Ленин, — не есть материализм, а есть *метафизический*, т. е. антидialeктический материализм» [26, с. 275].

Кроме того, если придать энергии смысл атрибута материи, то то же самое следует сделать и по отношению к вектору импульса, который является не менее общей величиной, чем энергия, и в современной физической теории представляет собой часть единого четырехмерного вектора импульса — энергии. Именно такую точку зрения высказывают Ю. Б. Румер и Н. Ф. Овчинников в статье [29], где прямо говорится, что «энергия — импульс суть универсальные атрибуты материи, без которых существование материи невозможно». Но тогда к «универсальным атрибутам материи» следует причислить также момент количества движения, который в рамках современной физической теории также является «абсолютно» сохраняющейся величиной. Более того, если быть последовательным, то в качестве атрибутов материи следует рассматривать и другие «абсолютно» сохраняющиеся характеристики: электрический заряд, барионное и лептонное числа и т. д.

Сейчас нельзя привести каких-либо соображений в пользу того, что эти величины являются «менее общими», чем энергия, импульс или угловой момент. В статье Ю. Б. Румера и Н. Ф. Овчинникова все эти величины действительно рассматриваются как «атрибуты материи» [18, с. 91]. В методологическом отношении такая массовая абсолютизация вполне конкретных физических величин представляется крайне неудовлетворительной и по существу мало чем отличается от концепций древних, согласно которой весь мир состоит из огня, воды, земли и воздуха.

Мы видим, что выделение энергии в исключительную, абсолютную категорию приводит к трудностям не только философского, но

и чисто физического характера. Что же касается изотропии пространства и пространственно-временной однородности, то эти свойства фактически становятся при этом предметом веры.

Аналогичный методологический (и физический) просчет допускают те авторы, которые «всеобщность энергии» видят в ее связи с массой материальных объектов, являющейся по их мнению «неким совершенно неотъемлемым, внутренне присущим свойством, атрибутом любого тела. И не только тела» [27, с. 270]. А поскольку масса и энергия связаны между собой формулой Эйнштейна $E=mc^2$, то из абсолютности массы следует абсолютность энергии. Нетрудно видеть, что философская категория материи здесь фактически подменяется физической категорией массы.

Неточно трактуется этот вопрос и в известной книге «Философия естествознания», где говорится о том, что соотношение Эйнштейна $E=mc^2$ «безотносительно к отождествлению массы с материей утверждает, что любой материальный объект обладает массой и пропорциональной ей энергией, что не может существовать материального объекта, не обладающего соответствующей энергией» [28, с. 102]. В действительности соотношение Эйнштейна устанавливает лишь взаимосвязь между массой и энергией (для тех случаев, когда эти величины существуют) и ничего не говорит о том, что «любой материальный объект обладает массой и энергией».

Не будем останавливаться на других соображениях, приводимых в пользу «абсолютной всеобщности» энергии, — все они приблизительно того же характера, что и рассмотренные выше, и лишь подчеркнем еще раз, что отказ от *предположения* об абсолютности энергии никоим образом не означает признания некой нематериальной сущности и никак не связан с допущением каких-то форм материи, не обладающих движением. Материя не мыслима без движения, однако свойства, а следовательно, и количественные и качественные характеристики движущейся материи могут быть совершенно различными на различных уровнях ее организации.

Важно отметить еще одно обстоятельство. Когда обсуждается проблема универсальности энергии, обычно подчеркивают, что до сих пор науке не известно ни одного случая, где применение известного сейчас понятия энергии приводило бы к трудностям. Тем не менее один такой случай можно указать. В рамках общей теории относительности, несмотря на многочисленные попытки, не удается непротиворечивым образом определить локальную плотность энергии. Величина, описывающая в общей теории относительности плотность энергии — импульса, оказывается псевдотензором, который ковариантен лишь по отношению к линейным преобразованиям системы координат (в частности, к преобразованиям Лоренца) и изменяется при более общих преобразованиях, из-за чего энергия, заключенная в конечной пространственно-временной области, зависит от конкретного выбора *пространственной*

системы координат. При переходе от одной системы координат к другой, без какого-либо изменения движения системы, энергия гравитационного поля может произвольно возникать или исчезать [29]. Простым преобразованием декартовых координат x, y, z в полярные r, φ, θ энергию конечной изолированной системы можно обратить в бесконечность, при этом плотность энергии в отдельных точках оказывается даже отрицательной [30].

Как устранить затруднения и насколько «катастрофическими» они являются для «энергетического описания», к которому мы привыкли в современной физике, остается пока не ясным. Для решения этой проблемы предлагалось много различных гипотез, однако ни одна из них не была достаточно удовлетворительной. (Подробнее с этими гипотезами можно познакомиться, прочитав, например, статью [18] и сборник [31].) * Во всяком случае, трудности, связанные с определением энергии, очевидны, и этого не следует забывать при обсуждении вопроса о «всебытности» энергии.

§ 18. Закон сохранения энергии и область его применимости

Уже только на основании сказанного в предыдущем параграфе следует считать необоснованными утверждения об «абсолютной всебытности и универсальности» закона сохранения энергии. Более того, нельзя исключить принципиальную возможность его нарушения даже в том случае, если ограничиться рассмотрением объектов, для которых энергия заведомо имеет смысл.

На первый взгляд весьма убедительным доводом в пользу неограниченной области действия закона сохранения энергии представляется то, что нарушение этого закона в каком-либо явлении в конечном счете равносильно исчезновению и появлению любой формы энергии, так как энергия обладает свойством взаимопревращения, и, следовательно, любой вид энергии может быть связан цепочкой превращений с той формой, которая исчезает или появляется [15, с. 21]. Общность закона сохранения энергии, — подчеркивает Н. Ф. Овчинников, — является следствием того, что этот закон «охватывает не какую-либо одну форму движения материи, но захватывает все формы движения, поскольку эти формы взаимопревращаемы» [8, с. 85].

Однако нарушение закона сохранения, существенное для некоторых весьма специфических явлений, в обычных процессах может быть чрезвычайно малым, подобно, например, тому, как нарушение пространственной четности в слабых взаимодействиях практически совершенно не оказывается на пространственной симметрии макроскопических явлений.

* Тензор энергии — импульса поля тяготения определен в работе [32], однако для этого пришлось фактически перейти к новой теории, в ряде пунктов значительно отличающейся от теории гравитации Эйнштейна.

Иногда в подтверждение универсальности закона сохранения энергии указывают на то, что этим законом на языке физики выражается «единство всего движения в природе». В том, что закон сохранения и превращения энергии действительно отражает эту важную черту материального мира, сомнений нет, но вместе с тем в равной степени нельзя сомневаться и в том, что закон сохранения энергии является всего лишь одним из бесчисленных способов, посредством которых выражается единство окружающей нас природы. Признание ограниченной области действия закона сохранения энергии вовсе не означает признания того, что в мире существуют какие-то самозамкнутые, не связанные друг с другом формы движения.

Еще одним аргументом, которым часто подкрепляют утверждение об «абсолютной всеобщности» закона сохранения энергии, является ссылка на общечеловеческую практику. Так, в монографии В. Н. Веселовского [15, с. 21] говорится: «Ответ на этот вопрос дает человеческая практика. Сталкиваясь с самыми разнообразными природными процессами, осуществляя в лабораториях многочисленные эксперименты, ученые ни разу за всю историю науки не наблюдали реального исчезновения или «рождения» энергии из ничего. Это обстоятельство является убедительнейшим аргументом в пользу абсолютности, всеобщности закона сохранения и превращения энергии». Нетрудно видеть, что приведенное рассуждение представляет собой лишь смелую, но весьма рискованную экстраполяцию в еще не исследованные области природы. История науки дает нам немало примеров, когда подобные экстраполяции, казалось бы, вполне очевидных закономерностей впоследствии оказывались совершенно неоправданными (стоит вспомнить хотя бы историю открытия несохранения пространственной четности).

Нельзя также согласиться с утверждением некоторых авторов (см., в частности, статью В. С. Готта и А. Ф. Перетурина [11, с. 78] о том, что «вопрос об ограничении закона сохранения и превращения энергии может быть поставлен только тогда, когда экспериментально будут доказаны его нарушения в каких-то областях природы, когда будут изобретены технические устройства, демонстрирующие нарушения этого закона». По мнению этих авторов, «философские положения, правильно понятые, свидетельствуют не о возможности ограничения закона сохранения и превращения энергии, а наоборот, о недопустимости предположения такой возможности до получения соответствующих экспериментальных данных» [11, с. 78]. Однако совершенно недопустимо сводить роль философии к интерпретации и осмысливанию уже известных экспериментальных фактов (тем более, что после того, как явление обнаружено на опыте, вопрос о его принципиальной возможности теряет интерес). Одна из важнейших функций современной философии как раз в том и заключается, чтобы, пользуясь методом диалектического материализма, на основе уже имеюще-

гося научного багажа ставить перед экспериментом фундаментальные мировоззренческие вопросы (а именно таковыми является, в частности, вопрос о всеобщности законов сохранения), анализировать, насколько «твёрды» с философской точки зрения основания общепринятых решений данных вопросов, и выяснить, приведет ли изменение этих решений к противоречию с нашими основными материалистическими представлениями о свойствах окружающего мира. Ярким примером такой постановки вопроса является философское положение о неисчерпаемости электрона, сформулированное В. И. Лениным еще задолго до того, как появились возможности экспериментального зондирования структуры частиц и атомных ядер.

В работе [7] вывод о «всеобщем характере» закона сохранения энергии сделан на основе тесной связи этого закона со свойствами пространства и времени: «учитывая эту связь, можно сказать, что всеобщий характер пространства и времени как форм бытия материи указывает на всеобщий характер закона сохранения и превращения энергии» [7, с. 175]. Однако в действительности указанная связь говорит скорее об обратном — о возможности нарушения закона сохранения энергии, поскольку допущение универсальности этого закона означает признание универсальными таких специфических свойств пространства и времени, как изотропия и однородность.

Следует особо остановиться на связи закона сохранения энергии с причинностью. В предыдущей главе отмечалось, что известные нам сейчас типы причинно-следственных цепей всегда связаны с передачей энергии (а также импульса и других сохраняющихся величин). На этом основании некоторые авторы приходят к выводу о том, что «нарушение действия закона сохранения и превращения энергии означало бы нарушение действия принципа причинности в природе, и, наоборот, нарушение действия принципа причинности означало бы нарушение действия закона сохранения и превращения энергии» [7, с. 166; 8, с. 86].

Н. Ф. Овчинников считает, что «выступление против закона сохранения энергии является одновременно выступлением против принципа причинности» [18, с. 27]. А поскольку принцип причинности был и остается краеугольным камнем в объяснении законов природы, то отсюда делается вывод об универсальности закона сохранения.

Известно также, что принцип причинности играл очень важную роль в открытии закона сохранения энергии и в устранении трудностей, неоднократно возникавших в науке в связи с кажущимся нарушением этого закона на опыте. Однако, как подчеркивалось выше, причинно-следственная связь есть лишь одна из бесконечно-го числа различных связей, осуществляющихся в природе, а известные нам сейчас формы причинности могут претерпеть существенное изменение при переходе в область ультрамалых размеров. Тот факт, что причинно-следственные цепи всегда несут в себе-

нечто субстанциональное, сохраняющееся (характернейшая черта такого типа связей), вовсе не означает, что это «нечто субстанциональное» обязательно должно быть энергией; можно лишь утверждать, что в цепях причинения происходит передача материи и движения [33]. Заключение о неразрывной связи цепей причинения с энергией представляет собой всего лишь экстраполяцию известных данных на весь бесконечный мир.

Иногда приводят и другие аргументы, призванные, по мнению их авторов, подтвердить принципиальную невозможность нарушения закона сохранения энергии, однако при более пристальном рассмотрении они неизменно оказываются основанными либо на неоправданных предположениях, либо на попытках обобщить известные физические законы на еще не изученные области.

Фетишизация закона сохранения энергии и боязнь, хотя бы в принципе, допустить возможность его нарушения у многих исследователей в значительной степени связаны с неявным, интуитивным сопоставлением: энергия связана с массой, т. е. в конечном счете с веществом, материей (в некоторых работах массу просто отождествляют с количеством материи; см., например, статью [34]), поэтому несохранение энергии может означать исчезновение или возникновение материи из ничего. Так, В. И. Свидерский последовательно и настойчиво отстаивает в своих работах положение об относительном характере всех форм и видов движения материи, он совершенно правильно отмечает, что «не может быть абсолютных универсальных физических законов, быть то закон тяготения, закон возрастания энтропии, единства химического состава и т. п.» [35, с. 43], но в то же время (буквально на следующей строке) считает необходимым подчеркнуть: «исключение здесь составляет закон сохранения массы и энергии, который выступает в качестве конкретного выражения общего закона сохранения движущейся материи».

Не нужно говорить, что подобное сопоставление конкретного физического закона с философским положением о сохранении материи и ее движения, согласно которому любой объект и его движения возникают только из других движущихся объектов и не могут бесследно исчезнуть [25], совершенно недопустимо. Закон сохранения энергии, как и любой физический закон, действует внутри конкретной, ограниченной области применимости и лишь вместе с неисчерпаемо большим числом других законов, описывающих превращения и переходы одних форм движущейся материи в другие ее формы, приближенно выражает общефилософский принцип сохранения. Совершенно недопустимо также использовать понятие массы в качестве абсолютной меры количества материи (подробнее см. монографию Н. Ф. Овчинникова [35]); как и всякая физическая величина, масса представляет собой характеристику лишь некоторых конкретных форм движущейся материи. Нарушение закона сохранения энергии, равно как и других законов сохранения, никоим образом не означает и не может

означать возможности уничтожения или сокрытия материи из ничего (а также и неразрывно связанного с ней движения).

Таким образом, нельзя привести доказательных соображений в пользу неограниченной применимости известных в настоящее время законов сохранения. Тем более необоснованной экстраполяцией являются утверждения о применимости законов сохранения ко всей бесконечной Вселенной. «В философском плане, — говорится в монографии [28, с. 133], — закон сохранения энергии мы экстраполируем и на Вселенную в целом, говоря, что не только в любой замкнутой конечной системе, но и в бесконечной Вселенной энергия не может возникать из ничего и уничтожаться». Даже в том гипотетическом случае, если бы какой-то закон сохранения выполнялся в любой конечной пространственно-временной области, распространение его на «весь мир в целом» представляется очень рискованной операцией. В действительности физическая бесконечность не есть простая сумма отдельных конечных частей, она реализуется через бесконечность меры, а нужно обладать незаурядной смелостью, чтобы утверждать, что при бесконечной последовательности глубоких качественных изменений форм материи и ее движения останутся справедливыми физические законы, выведенные на основании изучения явлений в ограниченной области пространства — времени.

Следует также иметь в виду, что используемое сейчас в физике определение законов сохранения как выполняющихся при *любых* взаимодействиях некоторого заданного типа потребует уточнения, если в дальнейшем окажется, что пространственно-временная область существования данного типа взаимодействий является более широкой, чем область действия закона сохранения.

В истории науки установление ограниченной области действия какого-либо закона сохранения часто сопровождалось открытием нового, более широко действующего закона сохранения и выработкой более общих понятий, поэтому можно ожидать, что если в будущих экспериментах действительно установят ограниченность законов сохранения энергии, импульса, электрического заряда и т. д., то их место займут более общие законы сохранения, которые будут глубже и точнее выражать объективные свойства материи и ее движения. Именно так обстоит дело, в частности, в модели квантования пространства — времени, предложенной В. Г. Кадышевским [37]. В этой модели при $\Delta x < 10^{-17}$ см энергия не сохраняется, однако закон сохранения энергии не просто отбрасывается, а заменяется более общим соотношением.

Следует, однако, заметить, что установление ограниченной области действия определенного закона сохранения, вообще говоря, не всегда связано с открытием какого-то более общего закона. Примером может служить нарушение закона сохранения изотопического спина при учете электромагнитных явлений. Когда становится существенным расщепление масс, обусловленное электромагнитными взаимодействиями, изотопический спин, как дополнитель-

тельный признак, по которому различаются несколько в остальном совершенно одинаковых объектов, просто теряет свой смысл. Нарушение изотопической инвариантности при этом не сопровождается установлением какой-либо более общей симметрии. Нарушение сохранения изотопического спина и странности в реакциях со слабыми взаимодействиями (см. § 19) также не связано с открытием более общих законов сохранения.

В прошлом для объяснения новых неожиданных экспериментальных результатов неоднократно предполагалось отказаться от закона сохранения энергии. Так было, в частности, на заре развития квантовой теории, когда Бор, Крамерс и Слетеर предлагали считать закон сохранения энергии выполняющимся лишь в среднем, а для индивидуальных микроявлений допускали возможность полного исчезновения или спонтанного возникновения порций энергии. О нарушении закона сохранения энергии шла речь, когда было установлено, что в распадах атомных ядер при учете всех испускаемых ими частиц (нейтрино в то время еще не было открыто) не выполняется баланс энергии — импульса. Хойл предполагал возможность возникновения массы из ничего в астрофизических процессах. Можно привести много других подобных примеров. Тем не менее каждый раз более тщательный анализ показывал полную справедливость закона сохранения энергии.

В настоящее время требование выполнения известных законов сохранения, в особенности закона сохранения энергии, рассматривается как один из важнейших критериев, которому должны удовлетворять физические теории во всей области их применимости. И лишь та теория, которая позволит непротиворечивым образом объяснить и согласовать значительно более широкий круг вопросов, чем все ныне известные теории, может претендовать на игнорирование этого критерия. Вместе с тем сейчас нет никаких методологических оснований «устанавливать шлагбаум», запрещающий движение в этом направлении.

Как подчеркивали В. С. Готт и А. Ф. Перетурин [11, с. 78], цель попыток ограничить закон сохранения энергии заключается не в доказательстве возможности «вечного двигателя», а в стремлении найти более общий закон сохранения, чем закон сохранения и превращения энергии, который будет также «запрещать» существование «вечного двигателя», но на основе сохранения не энергии, а какой-то более общей физической величины. В таком стремлении нет ничего антинаучного, и, как мы показали, оно вполне правомерно.

§ 19. Закон сохранения энергии для квантовых явлений. Виртуальные процессы

Закон сохранения энергии — импульса в квантовой области выполняется так же строго, как и для классических явлений. Никаких отклонений от этого закона, а следовательно, и нарушенний

однородности пространства — времени не обнаружено. Однако применение этого закона к микроявлениям требует обязательного учета их волновой специфики; в частности, формальное перенесение классических понятий и приемов приводит к различным знаниям энергии системы до и после взаимодействия. Примером может служить изображенный на рис. 21 процесс испускания γ -кванта. Покоящийся электрон с массой m и импульсом $p=0$ испускает фотон с импульсом q и получает при этом импульс отдачи $p=-q$. Энергия начального состояния $E_{\text{нач}}=m$ меньше энергии конечного состояния $E_{\text{кон}}=q + \sqrt{q^2+m^2}$. С точки зрения классической механики закон сохранения энергии здесь не выполняется.

Процессы, в которых рассчитанная по классическим формулам энергия системы в начальном и конечном состояниях оказывается различной, принято называть виртуальными процессами, а образующиеся в ходе этих процессов частицы — виртуальными частицами. Логическому анализу понятия виртуальности, сопоставлению его с более привычными образами классической физики и обсуждению различных путей устранения возникающих здесь затруднений с законом сохранения энергии в последнее время был посвящен ряд работ*. Тем не менее остается еще много путаницы, различных недоразумений, а то и грубых ошибок; для устранения парадоксов используют различные терминологические хищрения или придумывают умозрительные натуралистические построения. Как мы увидим ниже, при правильном квантовомеханическом рассмотрении никаких трудностей с законом сохранения энергии в микропроцессах в действительности не возникает.

«Виртуальная частица», «виртуальный процесс» являются одними из самых основных понятий современной теории поля и физики элементарных частиц. С ними мы встречаемся в теории ядерных сил, при обсуждении внутреннего строения частиц, при интерпретации опытов по их столкновениям и т. д. — фактически ни один результат физики элементарных частиц сейчас нельзя понять и осмыслить, не привлекая понятия виртуальности. При этом во всех случаях, когда мы с этим понятием встречаемся на практике — при выполнении расчетов, у нас не возникает каких-либо затруднений, и с виртуальными частицами мы формально оперируем так же, как и с обычными «реальными» частицами.

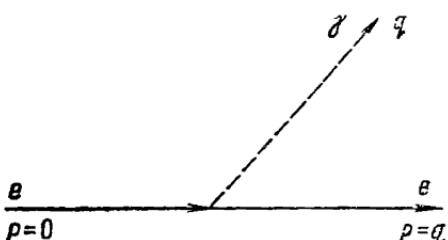


Рис. 21. Испускание виртуального γ -кванта в реакции $e \rightarrow e + \gamma$

* См., в частности, обстоятельные статьи В. С. Готта и А. Ф. Перетурина [9, 10], где можно найти подробную библиографию, а также монографии Л. Б. Баженова и др. и Р. Я. Штейнмана [28, 38].

Различия возникают лишь в тех случаях, когда мы интересуемся величинами, зависящими от кинематических характеристик частиц: хотя аппарат четырехмерных δ -функций современной квантовой теории формально обеспечивает выполнение законов сохранения энергии — импульса для всех наблюдаемых на опыте процессов, квадрат четырехмерного импульса q виртуальной частицы оказывается положительным, а ее формально вычисленная масса $m = \sqrt{-q^2}$ — мнимой *. Таким образом, различие между реальными и виртуальными частицами не имеет существенного значения, оно связано с кинематической переменной, характеризующей саму по себе частицу, а процесс, в котором она участвует.

Поскольку виртуальные частицы были введены в физику чисто теоретически, как результат формальной процедуры вторичного квантования, и с первого взгляда казались несовместимыми с законом сохранения энергии (на рис. 21 энергия $E_{\text{нач}} \neq E_{\text{кон}}$!), их долгое время рассматривали в качестве наглядной, но весьма условной интерпретации некоторых элементов математического аппарата теории, удобной при выполнении расчетов, другими словами, — как некоторый вспомогательный образ. Математические объекты, которым сопоставляли виртуальные частицы, встречались лишь на промежуточных этапах вычислений, поэтому указанная интерпретация не вызывала трудностей и долгое время оставалась общепринятой. Однако при дальнейшем развитии теории выяснилось, что можно ввести два существенно различающихся между собой типа виртуальных частиц: так называемые «голые» виртуальные частицы, соответствующие операторам поглощения и испускания точечных (бесструктурных) частиц, и «одетые» или, как еще иногда говорят, «облаченные» виртуальные частицы, имеющие такую же сложную внутреннюю структуру, как и частицы, наблюдаемые в начальных и конечных состояниях реакций. Частицы первого типа можно назвать «математическими», частицы второго типа — «физическими», возникающими в теории как результат действия особых «физических» операторов рождения и поглощения или как сложная совокупность («облако», «шуба») виртуальных математических частиц (рис. 22).

Если математические частицы еще можно рассматривать как некоторые искусственные образы (а более точно следовало бы сказать, что это — грубая аппроксимация физических частиц), то физические частицы по своим свойствам уже ничем не отличаются от обычных, наблюдаемых на опыте реальных частиц, хотя процессы поглощения и испускания этих частиц и происходят скажущимся нарушением закона сохранения энергии.

В стандартной формулировке теории элементарных частиц, когда в основе лежат уравнения свободных полей, а взаимодействие

* В этом легко убедиться, если перейти в систему координат, где импульсы электронов на рис. 21 равны друг другу. Условие $q^2 \geq 0$ (для γ -квантов $q^2 > 0$) можно рассматривать как определение виртуальной частицы.

Между ними введено как возмущающий член, мы во всех промежуточных состояниях имеем дело с математическими частицами и комбинациями. Отождествление частиц в начальном и конечном состояниях с физическими частицами производится в этом случае с помощью искусственной процедуры перенормировки. Именно такой подход позволил утверждать, что современная теория основана на концепции точечных частиц, а все виртуальные частицы в промежуточных состояниях имеют смысл лишь некоторых вспомогательных объектов и существенно отличны по своим свойствам от наблюдаемых на опыте реальных частиц. Однако при более последовательной формулировке (см., например, главу о диспер-

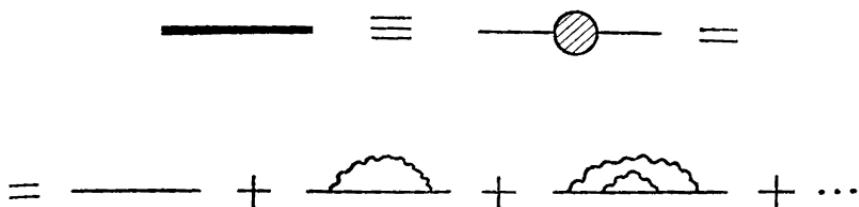


Рис. 22. Физическая частица, изображенная толстой линией, может быть представлена как совокупность различных взаимодействующих бесструктурных математических частиц, определяющих ее структуру

ционных соотношениях в книге Н. Н. Боголюбова и Д. В. Ширкова [39]) в теории с самого начала рассматриваются физические частицы, которые в свободном состоянии не взаимодействуют между собой, но всегда взаимодействуют с вакуумными полями. Свойства частиц в виртуальных промежуточных состояниях при этом ничем не отличаются от свойств частиц в наблюдаемых начальном и конечном состояниях.

Как правило, во всех случаях, когда в современной физической литературе о виртуальных частицах пишут как о некоторых вспомогательных символах или как о ненаблюдаемых объектах, речь идет о математических частицах, другими словами, — о наглядной интерпретации математического аппарата теории. В частности, именно о таких виртуальных частицах говорится в книге А. С. Давыдова [40, с. 713]. (Эти строки из книги [40] часто приводят как пример того, что некоторые физики отказывают виртуальным частицам в объективной реальности, считая их чисто мыслительными конструкциями.)

Опыты по исследованию структуры нуклонов и анализ так называемых периферических взаимодействий, описываемых диаграммами с одной виртуальной частицей в промежуточном состоянии (рис. 23), не только подтвердили существование виртуальных частиц в природе, но и не обнаружили никаких отклонений их

свойств от свойств реальных частиц. Поэтому неправильно встречающееся иногда в литературе утверждение о том, что виртуальные частицы представляют собой «становящиеся частицы» — не которые особые состояния реальных частиц, которые осуществляются лишь в моменты их превращений в другие частицы («существующие на грани бытия и небытия», [10, с. 78]), вследствие чего их ни в коем случае нельзя отождествлять с реальными частицами. Так, Р. Я. Штейнман [38, с. 205] пишет: «Мы характеризуем словами «облако виртуальных нуклонных пар» или «облако виртуальных пionов» поле нуклона в соответствующих

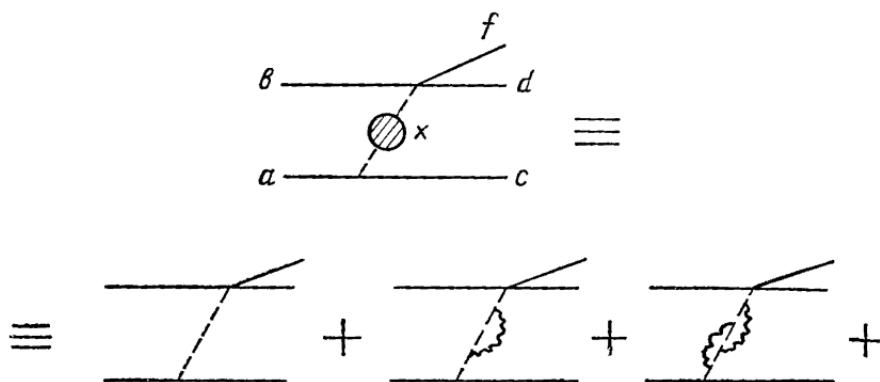


Рис. 23. Реакция $a+b \rightarrow c+d+f$ описывается диаграммой с промежуточной физической виртуальной частицей x . Из анализа свойств конечных частиц c , d , f можно получить сведения о массе и квантовых числах частицы x . Эти величины оказываются такими же, как и для соответствующей реальной (невиртуальной) частицы x

областях; это вовсе не означает, что в облаке нуклонных пар движутся реальные связанные пары нуклонов — антинуклонов; мы выражаем собственное поле нуклона через совокупность тех частиц, которые могут родиться при столкновении». В книге Л. Б. Баженова и др. [8, с. 81] также говорится о том, что «виртуальные частицы существенно отличаются от обычных частиц, называемых реальными». Сходные высказывания содержатся и в монографии А. М. Мостепаненко [41, с. 145].

Виртуальные частицы не менее реальны, чем создаваемая ими и наблюдаемая в экспериментах структура элементарных частиц.

Никак нельзя согласиться с утверждениями В. С. Готта и А. Ф. Перетурина (см. [9]) о том, что «виртуальные частицы не могут быть источниками полей, ибо они сами суть поля», что «виртуальные частицы являются квантами полей в их основном состоянии, а действительные частицы — квантами полей в возбужденных состояниях». В современной квантовой теории как реаль-

ные, так и виртуальные частицы описываются одними и теми же операторами поглощения и испускания (независимо от того, рассматриваются ли точечные математические или структурные физические частицы); в аппарате теории нет величин, характеризующих какие-то «особые состояния» элементарных частиц, как нет и способа, с помощью которого, не измеряя зависящего от конкретных внешних условий кинематического инварианта q^2 , можно было бы установить, какая это частица — виртуальная или реальная. Например, виртуальный фотон, уже испущенный электроном и не взаимодействующий более с ним, следует рассматривать как обыч-

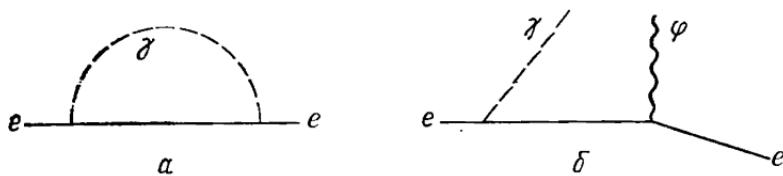


Рис. 24. Фотон, испущенный электроном, может или снова поглощаться электроном, если электрон *далее* ни с чем не взаимодействует (а), или вылететь как свободная частица, если электрон *в последующем* испытывает взаимодействие с внешним полем (б). В первом случае мы имеем дело с виртуальным фотоном, во втором случае тот же самый фотон следует рассматривать как реальную частицу. Из этого примера хорошо видна вся условность различия виртуальных и реальных частиц

ную фиксируемую на опыте реальную частицу, если далее произошло взаимодействие электрона с внешним полем (фотон об этом взаимодействии «не знает»; рис. 24). Виртуальность частицы определяется не ее свойствами, а тем положением, которое данная частица занимает в рассматриваемом процессе.

Виртуальным частицам нельзя приписать мнимую массу, как это иногда делают, для того, чтобы формально удовлетворить классическим законам сохранения энергии и импульса; таких частиц в современной квантовой теории просто не существует. Ошибочно также утверждение о том, что виртуальные частицы нельзя зарегистрировать на опыте потому, что они относятся к процессам, происходящим в промежутке времени $\Delta t \leq 10^{-24}$ сек, принципиально не наблюдаемым в силу соотношения неопределенностей для энергии и времени (см. подборку высказываний различных авторов о свойствах виртуальных частиц в статье [10, с. 75]). Соотношение неопределенностей не запрещает наблюдать процессы даже в еще меньших интервалах Δt , тем более, как мы видели в примере на рис. 24, одну и ту же частицу можно рассматривать и как виртуальную, и как реальную.

В то время, как различие между физическими виртуальными и обычными реальными частицами является чисто условным, вир-

туальные процессы, наоборот, обладают существенной особенностью: для *расчетных* значений энергии частиц в этих процессах не выполняется закон сохранения*. Это часто формулируют как альтернативу: или объективность виртуальных процессов и отказ от всеобщности закона сохранения энергии, или признание всеобщности этого закона и отрицание объективного существования виртуальных процессов.

В неоднократно упоминавшейся уже статье В. С. Готта и А. Ф. Перетурина [10] сделана попытка устраниТЬ противоречие между признанием объективного существования виртуальных частиц и нарушением закона сохранения энергии ценой двух предположений: 1) кинетическая энергия свободной, невзаимодействующей частицы может сама по себе переходить в энергию ее внутреннего движения, в частности, — в энергию облака виртуальных частиц, порождаемого этой частицей; 2) поскольку состояние покоя относительно, то всегда существует система отсчета, где данная частица имеет достаточно большую кинетическую энергию, которая и служит источником ее внутренней энергии, источником ее «самовозбуждения». В. С. Готт и А. Ф. Перетурин называют это положение отказом от классического понятия изолированной системы. «Кинетическая энергия движения Земли вокруг Солнца, — пишут они на с. 89 обсуждаемой статьи, — не может перейти в тепловую энергию движения Земли без ее внешних взаимодействий с другими телами. Но указанная изоляция внешнего от внутреннего, ограничение превращения внешней энергии во внутреннюю не имеет абсолютного значения <...>. Для наших целей, — отмечается далее на с. 90, — весьма важно подчеркнуть, что источником возрастаания внутренней энергии системы может быть энергия ее внешнего движения; <...> всегда имеется система отсчета, в которой данное тело движется и, следовательно, имеет энергию <...>. Очевидно, поскольку каждое тело участвует в различных движениях, а их бесконечное множество, то каждое тело обладает неисчерпаемой энергией. Применяя это положение к виртуальным процессам, мы устранием все трудности с источниками таких излучений».

Нетрудно видеть, что предположения В. С. Готта и А. Ф. Перетурина не только не устраниют затруднений, но сами находятся в противоречии с законами физики. Во-первых, кинетическая энер-

* В статье Ф. М. Землянского [42] говорится: «Специфика виртуальных процессов проявляется прежде всего в том, что участвующие в этих процессах частицы всегда существуют только в связанном состоянии. Сила этой связи настолько велика, что «виртуальная частица почти полностью теряет свою массу». Но о каком связанном состоянии может идти речь, например, в случае испускания фотона электроном на рис. 21 и 24? Очевидно, следует говорить не о связанных состояниях, а о том, что в результате виртуальных процессов испускания — поглощения частицы с массой m статистически образуется облако частиц с размерами $\Delta x \sim \hbar / \Delta p \sim \hbar / mc$. Связанные состояния имеют совершенно другие свойства и здесь абсолютно ни при чем.

тия любого тела (элементарные частицы в этом смысле не составляют исключения) может перейти в его внутреннюю энергию только при условии взаимодействия с каким-то другим телом именно потому, что иначе нельзя одновременно удовлетворить закону сохранения энергии и закону сохранения импульса. Исключения из этого правила не известны. В качестве примера, когда кинетическая энергия изолированной системы «сама по себе», без всяких внешних причин переходит в ее внутреннюю энергию, в статье [10, с. 90] приводится черенковское излучение электрона. Такое излучение, действительно, происходит за счет уменьшения кинетической энергии излучающего электрона. Однако этот процесс осуществляется лишь в среде вследствие взаимодействия излучающего электрона с электрическим зарядом атомарных электронов, которые и играют роль «внешнего тела». В вакууме такой процесс невозможен и никогда не наблюдался*. Во-вторых, нельзя объяснить «неисчерпаемость энергии» тела произволом в выборе системы отсчета, так как воспользоваться этой энергией, реализовать ее, можно лишь, замедлив движение тела, выбранного в качестве соответствующей точки отсчета; хорошо известно, что физический смысл имеет только энергия *относительного* движения. Исключений из этого правила современная наука также не знает. Положение не спасают даже утверждения о том, что виртуальное существование — это существование возможное, мгновенное, отражаемое понятиями возможности, становления и вероятности**.

Для того чтобы понять, каким образом реальное существование виртуальных частиц можно совместить с законом сохранения энергии, следует прежде всего учесть, что заключение о нарушении этого закона получено из сравнения значений энергии, относящихся к двум *различным* моментам времени: к моменту начального состояния t_1 и к моменту конечного состояния t_2 [на рис. 21 $E_{\text{нач}}=E(t_1)$ и $E_{\text{кон}}=E(t_2)$]. Однако в соответствии с основным законом квантовой теории энергию замкнутой системы нельзя определить без того, чтобы не подвергнуть ее неконтролируемому

* Это утверждение требует уточнения, когда частица движется в вакууме со сверхсветовой скоростью. Однако и в этом случае можно привести соображения, запрещающие черенковское излучение в вакууме.

** Неоправданным является также утверждение о существовании у каждой микросистемы «волны энергии», в результате чего энергия этой системы остается постоянной лишь в среднем, а в промежуточные моменты принимает некоторое «минимальное и максимальное значения», причем «энергия», необходимая электрону для испускания фотона, берется из максимального значения волны энергии данного электрона [10, с. 87].

Из того факта, что в соответствии с законами квантовой механики пространственно-временное положение частицы, а следовательно, ее массы и энергии, вероятно описывается волновой функцией, вовсе не следуют переменные значения энергии частицы. В частности, для изолированной (свободной) микрочастицы волновая функция $\Psi = \exp [i(p\mathbf{x} - Et)/\hbar]$, а ее импульс p , энергия E и соответствующая вероятность $W = \Psi \Psi^*$ постоянны.

изменению, связанному с неопределенностью $\Delta E \sim \hbar/\Delta t$, где $\Delta t = t_2 - t_1$ — длительность процесса измерения. Поэтому для интервалов $\Delta t \sim \hbar/mc^2$, где m — масса испущенной или поглощенной частицы, неопределенность в определении энергии $\Delta E \sim mc^2$, т. е. как раз такого же порядка величины, как и разность рассчитанных значений энергии частиц $E_{\text{кон}} - E_{\text{ нач}}$ (существенно, что энергию виртуальной частицы всегда рассчитывают, а не измеряют, иначе в пределах экспериментальной погрешности ΔE мы бы автоматически получили равенство $E_{\text{кон}} = E_{\text{ нач}}$).

Таким образом, никакого нарушения закона сохранения энергии в виртуальных процессах в действительности не происходит, это нарушение возникает лишь как следствие недостаточно корректного теоретического анализа. Пространство — время в квантовой механике такое же непрерывное и однородное, как и в классической теории.

Вопрос о характере виртуальных процессов является чисто физическим, он имеет в современной теории точный ответ, и в отличие от многих других проблем, которыми так богата теоретическая физика, не требует для своего решения привлечения каких-либо философских гипотез.

§ 20. В каком смысле следует понимать «несохранение» свойств и «нарушение» законов сохранения?

В философской и физической литературе, когда речь идет о законах сохранения с ограниченной областью действия, обычно принято говорить о нарушении этих законов сохранения и несохранении соответствующих физических величин. Однако есть и другая точка зрения (наиболее четко выраженная в книге В. Н. Веселовского [15, с. 41]), согласно которой «применение терминов «несохранение», «нарушение», законов сохранения, «несоблюдение» и т. д. является неточным, так как смысл их состоит в том, что в природе, якобы, существует не только сохранение рассматриваемых свойств материи, но возможно и несохранение их, т. е. возможно исчезновение их в определенных условиях, а следовательно, и появление свойств неизвестно откуда <...>. Но наблюдение несохранения каких-то свойств в определенных условиях есть лишь свидетельство, что эти свойства в данных условиях просто никогда не проявляются».

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Нет никаких сомнений в том, что объективно существующие свойства материальных систем проявляются лишь при взаимодействиях (или, более общо, в отношениях). Это подчеркивал еще Гегель [43, с. 581]. Вместе с тем многие свойства материальных объектов, изучаемые современной наукой, представляют собой «приближенные» свойства в том смысле, что они имеют место лишь в определенном круге явлений, вне которого эти свойства теряют свой смысл.

Ярким примером такого приближенного свойства может служить изотопический спин, который характеризует различные состояния частицы, когда эффекты, обусловленные разностью масс этих состояний, пренебрежимо малы по сравнению с эффектами, обусловленными взаимодействиями основного типа. В области электромагнитных взаимодействий вклад разности масс частиц, рассматриваемых как различные изотопические состояния одной частицы, оказывается порядка основного эффекта. Разноименно заряженные частицы ведут себя в этом случае как существенно различные частицы, и изотопический спин, а вместе с ним и весь изотопический формализм теряют свой смысл. И дело не в том, что изотопические свойства частиц «не проявляются в электромагнитных взаимодействиях» или что эти свойства «исчезли», — просто таких свойств не существует на данном уровне.

Уместно еще раз сослаться на упоминавшееся уже высказывание В. И. Ленина о том, что каждому конкретному уровню материи соответствуют свои специфические свойства, которые могут теряться при более детальном рассмотрении явлений. Именно такой смысл будет иметь нарушение закона сохранения энергии в том случае, если действительно выяснится, что на некотором уровне организации материи характеристика ее движения — энергия — теряет свой смысл.

Иной смысл «несохранение» имеет тогда, когда речь идет о сравнении свойств материальной системы до и после взаимодействия и когда эти свойства имеют полный смысл как в первичной, так и во вторичной системах. В качестве примера можно привести нарушение закона сохранения странности в слабых взаимодействиях. Так, при распаде Λ -гиперона на нуклон и π -мезон, $\Lambda \rightarrow N + \pi$, странность начальной и конечной систем вполне определена: $S_{\text{нач}} = -1$, $S_{\text{кон}} = 0$. Более того, в этом случае нельзя сослаться и на то, что в слабых взаимодействиях странность не проявляется, так как при слабых взаимодействиях выполняются определенные правила отбора по странности, а в некоторых типах «слабых процессов» странность вообще сохраняется (например, при распадах $\Sigma^\pm \rightarrow \Lambda + e^\pm + v(\bar{v})$ и т. д.). Смысл «несохранения» здесь состоит в том, что сравниваются соответствующие свойства *различающихся* первичной и вторичной систем.

Такой же смысл имеют различие изотопических свойств в начальном и конечном состояниях реакций (например, в реакции перезарядки $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$), несохранение пространственной и зарядовой четности при взаимодействиях частиц и ядер и т. д.

Если первичную и вторичную системы в каждом из этих случаев рассматривать как два состояния одной и той же материальной системы, то можно сказать, что смысл «несохранения» заключается в изменении количественной меры определенного свойства системы (само свойство при этом остается) или в исчезновении этого свойства в связи с более точным анализом. Поэтому формул-

лировку «принципа сохранения», предложенную в монографии В. Н. Веселовского [15, с. 50]: «В процессе непрерывного изменения объективного мира свойства материи и движения не возникают и не уничтожаются, а сохраняют свою качественную и количественную определенность», — следует считать неудовлетворительной. Она неверна в той ее части, которая касается количественных измерений, и не учитывает, что в некоторых случаях сохранение имеет место до тех пор, пока дело не касается таких областей, в которых само рассматриваемое свойство теряет смысл.

Неприемлема также и формулировка «общего закона сохранения», предложенная М. В. Мостепаненко [22, с. 159—161]; общая мера движения замкнутой системы является суммой соответствующих парциальных мер всех объектов — компонент, составляющих

систему ($\sum_{i=1}^n x_n = x = \text{const}$), так как сформулированный таким

образом закон не содержит независимого определения меры движения, и его можно применять лишь по отношению к тем величинам, для которых уже заранее известно, что они представляют собой сохраняющиеся меры движения, а в этом случае утверждение не содержит ничего нового. По мнению М. В. Мостепаненко, важной чертой сформулированного им закона является то обстоятельство, что «данный закон относится к сумме разных значений x одной и той же меры движения, а не к сумме величин качественно различных мер движения». Однако это — просто необходимое условие для того, чтобы вообще имело смысл всякое сравнение и сопоставление величин (в частности, операция суммирования).

Можно сомневаться, действительно ли в природе существует такой «наиобщий закон сохранения», который не совпадал бы с известным законом сохранения материи и движения и в то же время единым и не тривиальным образом выражал бы общее, что свойственно всем частным законам сохранения.

§ 21. Экспериментальная проверка законов сохранения

Ни в одном из выполненных до настоящего времени экспериментов не было обнаружено каких-либо признаков пространственной анизотропии или неоднородности пространства и времени.

В недавней работе [44] тщательно измерялись различия в скорости света, распространяющегося по разным направлениям. Эти различия («эфирный ветер», характеризующий степень анизотропии пространства) не превосходят $0,045 \pm 3,8 \text{ см/сек}$.

Проверка основанных на законах сохранения энергии импульса соотношений релятивистской кинематики в опытах с упругими столкновениями частиц показала, что во всей доступной

исследованию с помощью ускорителей области $\Delta x \geq 7 \cdot 10^{-16}$ см и $\Delta t \geq 2 \cdot 10^{-26}$ сек эти соотношения в пределах экспериментальных погрешностей (т. е. по крайней мере до нескольких процентов) хорошо выполняются [45].

Как отметил Д. И. Блохинцев, в случае неоднородности микроскопического пространства — времени одна из систем координат может оказаться выделенной [46]. Это, в частности, могло бы означать, что физические процессы в лабораторной системе координат и в системе центра масс протекают различным образом. Тщательное исследование этого вопроса в опытах по двухпионному распаду K_L -мезонов показало, что для интервалов $\Delta x \geq \geq 10^{-14}$ см, $\Delta t \geq 3 \cdot 10^{-24}$ сек физические реакции в разных системах координат протекают совершенно одинаково (с экспериментальной погрешностью около 1%) [45, 47].

Теоретические модели предсказывают, что отклонения от однородности и изотропии пространства — времени можно ожидать на уровне масштабов $\Delta x \leq 10^{-17}$ см, $\Delta t \leq 10^{-27}$ сек или в еще более «глубоких» областях. Для больших масштабов эти отклонения можно заметить лишь при очень высокой точности измерений, что, впрочем, не является совершенно безнадежной задачей.

Метрика пространства — времени изменяется в гравитационных полях, это находит свое отражение в трудностях, связанных с определением энергии — импульса и с формулировкой закона сохранения этих величин для ограниченных областей пространства и времени. Выше уже отмечалось, что многие авторы (см., например, [18]) рассматривают этот факт всего лишь как недостаток современной теории гравитации, постулируя, что законы сохранения энергии и импульса должны выполняться абсолютно строго. Однако вопрос весьма не ясен. Как показывает история науки, для того чтобы разрешить противоречия, возникшие в рамках какой-то определенной теории, необходимо выйти за ее пределы. Понятно, что для этого прежде всего нужны новые экспериментальные данные; однако важным источником идей, необходимых для построения новой теории, могут служить также сами трудности и парадоксы, возникшие внутри известной теории. В этом направлении можно ожидать интересных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Релятивистская астрофизика. М., «Наука», 1967.
2. Гуревич Л. Э., Глинер Э. Б. Общая теория относительности после Эйнштейна. М., «Знание», 1972.
3. Мэтьюс П. Релятивистская квантовая теория взаимодействий элементарных частиц. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
4. Квантовая теория калибровочных полей. — Сб. статей. Пер. с англ. М., «Мир», 1977.
5. Коккеде Я. Теория夸克ов. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
6. Вигнер Е. Этюды о симметрии. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.

7. **Овчинников Н. Ф.** Законы сохранения в физике и причинная обусловленность явлений природы. — В кн.: Проблемы причинности в современной физике. М., Изд-во АН СССР, 1960.
8. **Овчинников Н. Ф.** Принципы сохранения. М., «Наука», 1966.
9. **Готт В. С., Перетурин А. Ф.** О философских вопросах теории виртуальных частиц и процессов. — «Философские науки», 1965, № 4, с. 10.
10. **Готт В. С., Перетурин А. Ф.** Методологические вопросы изучения виртуальных процессов. — В кн.: Симметрия, инвариантность, структура. М., «Высшая школа», 1967.
11. **Готт В. С., Перетурин А. Ф.** Абсолютное и относительное в законе сохранения и превращения энергии. — «Вопросы философии», 1967, № 3, с. 76.
12. **Мостеланенко А. М.** Проблема универсальности основных свойств пространства и времени. Л., «Наука», 1969.
13. **Барашенков В. С.** Новейшее развитие физики и законы сохранения. — «Вопросы философии», 1967, № 6, с. 73.
14. **Понятие виртуальности в физике элементарных частиц.** — «Философские науки», 1972, № 5, с. 77. Авт.: В. С. Барашенков и др.
15. **Веселовский В. Н.** Философское значение законов сохранения материи и движения. М., «Мысль», 1964.
16. **Нетер Э.** Инвариантные вариационные проблемы. — В кн.: Вариационные принципы механики. Пер. с нем. М., Физматгиз, 1959.
17. **Ибрагимов Н. Х.** Инвариантные вариационные задачи и законы сохранения (замечания к теореме Э. Нетер). — «Теоретическая и математическая физика», 1969, т. 1, с. 350.
18. **Румер Ю. Б., Овчинников Н. Ф.** Пространство — время, энергия — импульс в структуре физической теории. — «Вопросы философии», 1968, № 4, с. 82.
19. **Берестецкий В. Б.** Калибровочные симметрии и единая теория слабого и электромагнитного взаимодействий. — Материалы 1-й школы по физике ИТЭФ. М., Атомиздат, 1973, с. 3.
20. **Самускевич А. В.** Методологическое значение диалектико-материалистического учения о движении. — В кн.: Диалектический материализм как методология естественно-научного познания. Минск, «Наука и техника», 1965.
21. **Философские вопросы современной физики.** Сб. статей. Киев, «Наукова думка», 1963.
22. **Философские вопросы современного учения о движении.** Сб. статей. Л., ЛГУ, 1962.
23. **Овчинников Н. Ф.** О классификации принципов сохранения. — «Вопросы философии», 1962, № 5, с. 75.
24. **Свидерский В. И.** Некоторые вопросы диалектики изменения и развития. М., «Мысль», 1965.
25. **Энгельс Ф.** Диалектика природы. — К. Маркс, Ф. Энгельс. Сочинение. Изд. 2-е. Т. 20.
26. **Леинин В. И.** Материализм и эмпириокритицизм. Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 18.
27. **Наан Г. И.** Гравитация и бесконечность. — В кн.: Философские проблемы теории тяготения Эйнштейна и релятивистской космологии. Киев, «Наукова думка», 1965.
28. **Философия естествознания.** Вып. 1. М., Госполитиздат, 1966. Авт.: Л. Б. Баженов и др.
29. **Schrödinger E.** Die Energiekomponenten des Gravitationsfeldes. — «Z. Phys.», 1918, Bd 19, S. 4.
30. **Bauer H.** Über die Energiekomponenten des Gravitationsfeldes. — «Z. Phys.», 1918, Bd 19, S. 163.
31. **Новейшие проблемы гравитации.** Сб. статей. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
32. **Логунов А. А., Фоломешкин В. Н.** Проблема энергии — импульса и теория гравитации. Препринт ИФВЭ ОТФ 77-53. Серпухов, 1977.

33. Кузнецов И. В. Принцип причинности и его роль в познании природы. — В кн.: Проблема причинности в современной физике. М., Изд-во АН СССР, 1960.
34. Будтов Н. Е. К вопросу о массе. — «Вопросы философии», 1954, № 12, с. 203.
35. Свидерский В. И. Пространство и время. М., Госполитиздат, 1958.
36. Овчинников Н. Ф. Понятия массы и энергии в их историческом развитии и философском значении. М., Изд-во АН СССР, 1957.
37. Кадышевский В. Г. Теория поля в квантованном пространстве — времени. — Материалы 12-й Междунар. конф. по физике высоких энергий. Т. 2. Дубна, 1964, с. 232.
38. Штейнман Р. Я. Пространство и время. М., Физматгиз, 1962.
39. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М., Гостехиздат, 1957.
40. Давыдов А. С. Квантовая механика. М., Физматгиз, 1963.
41. Мостепаненко А. М. Пространство — время и физическое познание. М., Атомиздат, 1975.
42. Землянский Ф. М., Симметрия, асимметрия и виртуальность в структуре элементарных частиц. — В кн.: Симметрия, инвариантность, структура. М., «Высшая школа», 1967.
43. Гегель Г. В. Сочинения. Т. 5. М.—Л., Госполитиздат, 1929—1959.
44. Experimental search for anisotropy in the speed of light. — «Phys. Rev. D», 1973, v. 8, p. 3321. Auth.: W. S. N. Trimmer e. a.
45. Evidence for the 2π -Decay of the K^0_2 -meson. — «Phys. Rev. Lett.», 1964, v. 13, p. 138. Auth.: I. H. Christenson e. a.
46. Блохиццев Д. И. Обоснованность специальной теории относительности опытами в области физики высоких энергий. — «Успехи физ. наук», 1966, т. 89, с. 185.
47. Two-pion decay of K^0_2 at 10 GeV/c . — «Phys. Lett.», 1965, v. 15, p. 58. Auth.: X. De Bouard e. a.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ОБОБЩЕНИЯ

Быстрое развитие эксперимента, позволяющего исследовать все более и более мелкие пространственно-временные интервалы, заставляет теоретиков задумываться о том, какие изменения могут претерпеть при этом привычные нам свойства пространства и времени и насколько подобные мыслимые изменения можно согласовать с другими известными сейчас физическими представлениями. Эти вопросы интенсивно обсуждаются на семинарах и специальных конференциях, им посвящены сотни статей. Интерес к анализу наших пространственно-временных представлений о микромире стимулируется также и тем, что в современной теории существуют расходящиеся выражения.

Есть еще одно обстоятельство, которое заставляет сейчас быть особенно внимательным к этим проблемам. Еще в пятидесятых годах Н. Н. Боголюбову впервые удалось сформулировать последовательную систему аксиом, представляющих собой фундамент современной теории поля. В дальнейшем другие теоретики разработали несколько отличные системы «полевых аксиом», однако суть всех этих построений примерно одинакова [1—4]. Оказалось, что ни одну из аксиом нельзя отбросить, не прия в противоречие с опытом. Это было показано путем построения полевых моделей, допускающих точное решение. В то же время никак не удается создать модель (кроме тривиального случая свободного невзаимодействующего поля), уравнения которой можно было бы действительно решить до конца и которая в то же время удовлетворяла бы полной системе «полевых аксиом». Можно утверждать, что известные аксиомы теории поля необходимы, но достаточны ли они — этого мы пока не знаем.

Возникает подозрение, что формулировка некоторых из этих аксиом, по-видимому, излишне детальна и поэтому настолько сильно ограничивает теорию, что последняя фактически становится бессодержательной. Возникает важная задача обобщения известных полевых аксиом с тем, чтобы требования, накладываемые на теорию, были более мягкими.

Сравнительно «просто» новую теорию строить в том случае, когда имеются опытные данные, определенно не укладывающиеся в рамки уже известной, старой теории; в этом случае в распоря-

жении теоретика есть «пробный камень» для испытания различных предположений. Так было, например, при зарождении квантовой теории, когда необъясенные законы теплового излучения и закономерности атомных спектральных термов представляли собой богатый экспериментальный материал для теоретиков.

Значительно труднее развивать теорию, если опыт пока еще не позволяет установить, какие из постулатов существующей теории являются неудовлетворительными и в каком направлении их следует видоизменять. При этих условиях в основу исследования можно положить лишь логический анализ различных теоретических возможностей. Однако такой подход также может оказаться весьма плодотворным. Это видно, в частности, на примере построения общей теории относительности, которую, как известно, Эйнштейн сформулировал в значительной степени путем логико-методологического анализа имевшейся в то время системы физического знания; непосредственное экспериментальное подтверждение положений этой теории было получено позднее.

В качестве основного эвристического принципа при таком подходе выступает требование логической стройности и самосогласованности теории. Новая теория должна не менее последовательно и с не меньшей точностью, чем существующая теория, объяснять все известные опытные факты, она должна удовлетворять принципу соответствия и при определенных условиях переходить в старую теорию, т. е. должна действительно представлять собой обобщение последней, а главное — новая теория должна содержать предсказательный элемент. Обобщение лишь тогда можно считать по-настоящему ценным и многообещающим, когда с его помощью предсказываются качественно новые физические явления. Чем больше качественное различие предсказываемых и известных явлений, тем большего внимания заслуживает новая теория; ну, а насколько она соответствует реальности, — это должен решить, конечно, последующий эксперимент. Правда, даже если эксперимент и не подтвердит предсказаний такой теории, исследование, тем не менее, не потеряет своего значения, так как в этом случае возникает вопрос: почему данное с нашей точки зрения вполне возможное явление не реализуется в природе? Поиск ответа на этот вопрос может привести к открытию совершенно новых законов природы.

Исследование различных возможностей обобщения основных положений современной физической теории позволяет получить представление об «устойчивости» этих положений, так сказать — о степени их общности, позволяет выделить наиболее уязвимые места современной теории, изменение которых связано с разрушением основ теории или, по крайней мере, с существенным изменением ее понятийного аппарата. Эти исследования многое дают для понимания структуры теории, для выяснения ее ограничений и внутренних трудностей.

С этих позиций и следует подходить к оценке значимости различных попыток обобщения современных пространственно-времен-

ных представлений. Понятно, что обобщения теории всегда связаны с явным или неявным решением определенных методологических мировоззренческих проблем. Как и любая попытка теоретического продвижения за пределы достигнутых знаний, эти обобщения являются философско-физическими гипотезами и представляют собой предмет не только физического, но и философского анализа.

Когда речь идет об обобщении существующих теорий, очень важно иметь в виду, что в силу количественной и качественной неисчерпаемости материального мира принципиально нельзя сформулировать каких-либо окончательных, «элементарных законов». Поскольку всякая теория не априорна, а представляет собой следствие эксперимента, который по самой своей сути имеет ограниченный, приближенный характер, конкретные естественно-научные теории не могут претендовать на описание процессов, протекающих в области сколь угодно малых и сколь угодно больших пространственно-временных интервалов. Теория должна строиться таким образом, чтобы оставался пренебрежимо малым вклад от недоступных пока еще нашему экспериментальному исследованию областей, где физические величины приобретают предельно малые (близкие к нулю) или очень большие (приближающиеся к бесконечности) значения*.

В литературе содержится большое число различных предложений о том, как можно было бы изменить пространственно-временные отношения в области очень малых значений Δx и Δt . Тем не менее, несмотря на их внешнее различие, эти предложения в сущности представляют собой конкретную реализацию всего лишь нескольких основных идей: предположения о возможности сверхсветовых скоростей сигналов, нарушающего известную формулировку причинности, учета нелинейных эффектов, рассмотрения дискретного пространства — времени [5—16].

В последнее время оживленно обсуждается еще одно направление, связанное с учетом гравитационных явлений в области очень малых масштабов. Хотя гравитационные взаимодействия сами по себе несравненно слабее, чем сильные, электромагнитные и даже слабые взаимодействия элементарных частиц, при определенных условиях они могут существенно сказаться на всей картине микромира, устанавливая неожиданную связь последнего с явлениями космического масштаба.

Большое внимание в последние годы уделялось геометродинамике — направлению, которое пытается трактовать дискретные материальные образования и заряды как некоторые топологические особенности пространства и времени. Эти попытки представляют

* Процедуру перенормировки, исключающую из рассмотрения такой экспериментально необоснованный, экстраполяционный элемент, иногда считают серьезным методическим недостатком теории, однако в действительности недостатком является не сама процедура перенормировки, а невозможность вычислить в современной теории такие величины, как массы частиц, их заряды, магнитные моменты и т. д.

собой дальнейшее развитие программы Эйнштейна, считавшего необходимым описывать чисто геометрически — лишь в терминах пространства и времени — не только гравитационное, но и все другие типы взаимодействий.

Далее мы кратко рассмотрим результаты этих основных направлений исследования, отдавая себе отчет в том, что развитие здесь происходит настолько быстро, что при выходе книги в свет многое, наверное, будет выглядеть уже как «пройденный этап».

Последний раздел книги посвящен рассмотрению подхода, в определенном смысле альтернативного геометродинамике, — отказу от пространственно-временных представлений при описании субъядерных явлений и допущению возможности «внепространственных» и «вневременных» форм существования материальных объектов. Хотя каких-либо конкретных теоретических схем, где был бы последовательно проведен подобный подход, сейчас неизвестно, критическое обсуждение связанных с этим проблем представляет большой методологический интерес.

§ 22. Тахионы

Тахионами (от греческого слова *tachis* — быстрый) называют гипотетические частицы, движущиеся в вакууме со скоростями, большими скорости света. На первый взгляд кажется, что такие частицы не могут существовать в природе, поскольку это находилось бы в очевидном противоречии с хорошо проверенными на опыте принципами теории относительности. Однако более подробное рассмотрение показало, что все противоречия можно устранить, если считать, что частица, движущаяся со скоростью $v < c$, не может путем *непрерывного* увеличения скорости превратиться в тахион, и наоборот — тахионы, если они существуют в природе, путем постепенного уменьшения своей скорости не могут перейти в обычные «досветовые частицы». Другими словами, тахионы и досветовые частицы представляют собой *существенно различные* типы частиц. Тахионы не преодолевают световой барьер; подобно тому, как фотон и нейтрино сразу рождаются со скоростью $v = c$, тахионы также могут рождаться и поглощаться, *всегда* имея скорость $v > c$ [17].

По-настоящему серьезные трудности гипотезы тахионов связаны с тем, что если допустить существование в природе скоростей сигналов, больших скорости света, то необходимо также допустить существование процессов с нефиксированным, неинвариантным направлением развития, когда явление может выступать и как причина, и как следствие в зависимости от выбора системы координат. Иначе говоря, для «сверхсветовых процессов» противопоставление прошлого и будущего имеет такой же относительный, условный смысл, зависящий от точки зрения, как противопоставление правого и левого в нашей обычной макроскопической практи-

ке. Если можно было бы полностью изолировать процесс со «сверхсветовыми частицами» от окружающей среды, то сама по себе такая возможность еще не являлась бы физически бессмысленной и при условии замены частиц античастицами с обратными направлениями скоростей не приводила бы ни к каким парадоксам. Однако, поскольку такая изоляция невозможна, то благодаря соседству досветовых событий, которые могут служить индикатором направления временной стрелы, возникают инвариантная «временная поляризация» событий и связанные с ней акаузальные эффекты.

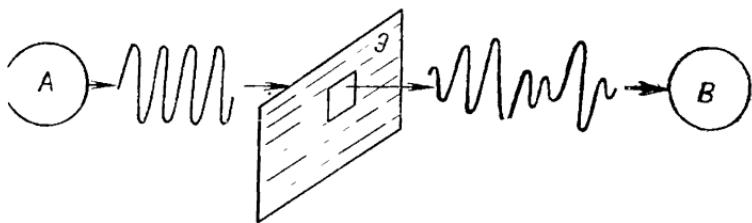
Это можно видеть на следующем примере. Пусть в некоторый момент времени t_0 мы имеем дело с двумя неподвижными атомами: атомом A в возбужденном и атомом B в его основном состоянии. В неподвижной системе координат в результате обмена тахионом сначала атом A переходит в невозбужденное состояние, а затем атом B возбуждается. Вследствие эффекта отдачи при испускании и поглощении тахиона оба первоначально покопавшихся атома после окончания процесса движутся. Наблюдатель, который перемещается со скоростью $u > c^2/v$ (подчеркнем, что эта скорость меньше скорости света, так что движение наблюдателя является вполне обычным, «досветовым»), зафиксирует изменение состояния атома B раньше, чем что-то произойдет с атомом A , и интерпретирует весь процесс как спонтанное излучение тахиона атомом B и последующее его поглощение атомом A . Таким образом, то, что происходит с атомом B , неподвижный наблюдатель воспринимает как поглощение, а движущийся наблюдатель — как спонтанное испускание тахиона. Никаких нарушений причинности пока нет.

Представим теперь, что атомы A и B разделены поглощающим тахионы экраном \mathcal{E} (рис. 25), в котором в заданный момент t на некоторое время Δt открывается щель. Повторяя этот опыт много раз, неподвижный наблюдатель, конечно, заметит, что распределение случаев возбуждения атома B во времени зависит от закона, по которому открывается щель в экране. Другими словами, сигнал, передаваемый от A и B , оказывается модулированным. Так как щель каждый раз открывается раньше, чем возбуждается атом B , никакого противоречия с принципом причинности неподвижный наблюдатель не обнаружит. Совершенно иную интерпретацию эксперименту будет вынужден дать движущийся наблюдатель, который также заметит корреляцию между видом распределения во времени случаев спонтанного возбуждения атома B и законом, в соответствии с которым открывается щель в экране. Однако, поскольку щель каждый раз открывается уже после того, как произошло возбуждение атома B , наличие корреляции будет восприниматься наблюдателем в движущейся системе координат как необъяснимый акаузальный эффект, при котором атом B заранее «знает» о том, по какому закону будет открываться и закрываться щель. Например, в точке \mathcal{E}' , расположенной между экраном и

атомом B , факт модуляции сигнала, передаваемого от B к A , будет выглядеть как абсолютно самопроизвольное явление.

В процессах со сверхсветовыми сигналами временной порядок событий зависит от выбора системы координат (от скорости ее относительного движения), в то время как направление потока информации (энергии взаимодействия), составляющее основу причинно-следственной связи, остается инвариантным по отношению к изменению системы координат, вследствие чего и происходит нарушение причинности.

В системе координат I:



В системе координат II:

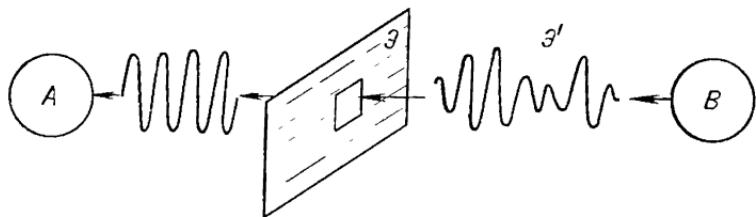


Рис. 25. Модулирование пучка тахионов:

I — для неподвижного наблюдателя сигнал модулируется после прохождения им щели экрана \mathcal{Z} ; *II* — для движущегося наблюдателя сигнал оказывается модулированным еще до достижения им экрана

Тем не менее сами по себе эти результаты еще нельзя рассматривать как доказательство принципиальной невозможности сверхсветовых взаимодействий. В природе могут существовать области явлений, где понятие временного порядка вообще неприменимо. Такое имеет смысл, весьма отличный от того, к чему мы привыкли; требование инвариантной хронологизации причинно-следственной связи в этих условиях уже не является необходимым. Такие аномальные с привычной точки зрения процессы могут быть очень слабо связаны с известными нам электромагнитными и сильными взаимодействиями частиц, в рамках которых проверялись дисперсионные соотношения, и поэтому не обязательно влияют на результаты проверки.

После того как в опытах с распадами K -частиц было установлено, что физические явления могут быть неинвариантными по от-

ношению к отражениям пространства и времени (см. § 14), такая возможность не кажется абсолютно невероятной. Обмен сверхсветовыми сигналами в этих условиях не связан с нарушением причинности, никаких акаузальных эффектов мы с помощью макроскопических приборов при этом не зафиксируем, подобно тому, например, как вследствие соотношения неопределенностей $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ нельзя экспериментально зафиксировать каких-либо нарушений закона сохранения энергии — импульса при виртуальных квантовых процессах. Вместе с тем известное определение причинно-следственной связи, существенно использующее понятие временного порядка, при этом становится уже неприменимым и требует обобщения.

Поиск «сверхсветовых обобщений» теории относительности вполне оправдан как с общеметодологической, так и с чисто физической точек зрения.

§ 23. Нелокальные, нелинейные и неренормируемые теории. Квантование пространства — времени

Главная идея, лежащая в основе различных нелокальных обобщений современной теории, заключается в предположении о том, что в области пространственно-временных интервалов, меньших некоторой новой универсальной постоянной размерности длины l_0 , взаимодействие становится неточечным, «размазанным». Другими словами, предполагается, что в области

$$\Delta x \leq l_0, \Delta t \leq l_0/c \quad (x = |x|) \quad (45)$$

имеет место «эффект дальнодействия», когда сигналы передаются со сколь угодно большой скоростью, благодаря чему пространственно-временная область (45) участвует в процессе взаимодействия сразу всеми своими точками, как единое целое (рис. 26). Взаимодействие в этом случае происходит так, как если бы пространство в ультрамалых областях $\Delta x \leq l_0$ обладало свойствами абсолютно твердого тела.

При таком подходе постулат локальности, рассматривающий события как лишенные размеров четырехмерные мировые точки, представляет собой всего лишь абстракцию, подобную, например, приближению материальной точки в классической механике. В нелокальной теории любое событие имеет пространственно-временную протяженность (45). Пространство и время в «области нелокальности» по-прежнему сохраняют свой смысл, однако свойства их предполагаются качественно иными, чем в области макроскопических масштабов.

Можно по-разному относиться к идее нелокальности: рассматривать ее как модельное огрубление реальной ситуации, в которой не может быть абсолютно жестких структур и мгновенных сигналов, или же, наоборот, придавать непосредственный физический

смысл таким непривычным с точки зрения современных представлений свойствам микроявлений, однако в любом случае очень важно отдавать себе отчет в том, что введение нелокальности во все не означает, как это иногда утверждают (см., например, [18, с. 254]), признания вневременного существования материальных процессов.

В настоящее время известно много различных способов введения в теорию нелокальных обобщений. Самый простой из них за-

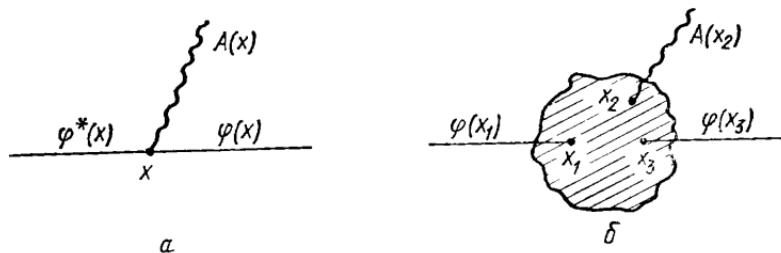


Рис. 26. В локальной теории (а) акт взаимодействия полей A и ϕ происходит в одной точке x . Например, мезон с импульсом p поглощает в точке x γ -квант с импульсом k и вылетает из этой же точки с импульсом $p-k$. В нелокальной теории (б) взаимодействие полей A и ϕ происходит в точках, разделенных интервалами Δx , $\Delta t \lesssim l_0$. В частности, мезон с импульсом p и γ -квант с импульсом k поглощаются в точках x_2 и x_3 и вследствие этого из точки x_1 вылетает мезон с импульсом $p-k$. Поскольку взаимодействие передается мгновенно, законы сохранения при этом не нарушаются. Внутри области нелокальности (заштрихована) точки x_1 , x_2 , x_3 могут быть любыми, поэтому выражения, описывающие взаимодействие, должны содержать интегралы по «четырехмерным переменным» x_1 , x_2 , x_3

ключается в замене в исходных соотношениях теории всех выражений типа $\Phi^*(x)A(x)\Phi(x)$, описывающих локальное взаимодействие полей A и Φ , выражениями

$$\Phi^*(x_1)A(x_2)\Phi(x_3)G(x_1, x_2, x_3), \quad (46)$$

где G — обрезающая функция, так называемый форм-фактор, обращающаяся в нуль для больших интервалов $|x_i - x_j| > l_0$, $|t_i - t_j| > l_0/c$ и удовлетворяющая принципу соответствия:

$$G(x_1, x_2, x_3) \xrightarrow{l_0 \rightarrow 0} \delta(x_1 - x_2)\delta(x_2 - x_3). \quad (47)$$

Вид функции G определяет структуру области нелокальности.

Поскольку у нас сейчас нет совершенно никаких физических соображений, которые бы помогли однозначно определить вид функции G , эту функцию обычно рассматривают как некоторый феноменологический элемент теории в расчете на то, что произвол в ее выборе удастся устранить при сравнении результатов расчетов с данными эксперимента или в рамках какой-то будущей бо-

лее детальной теории. Единственное, что требуется от функции G : выражение (46) должно оставаться инвариантным при переходе от одной системы координат к другой. Нетрудно сообразить, что это условие будет выполнено, если функция G зависит от координат x_i лишь через инварианты Δs^2_{12} , Δs^2_{23} , Δs^2_{13} , где

$$\Delta s^2_{ik} = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k|^2 - c^2 |\mathbf{t}_i - \mathbf{t}_k|^2 \quad (48)$$

(Δs^2_{12} выражается через Δs^2_{13} и Δs^2_{23}).

На первый взгляд может показаться, что при указанном выборе форм-фактора сверхсветовое дальнодействие будет осуществляться

и в макроскопических областях, поскольку вблизи светового конуса, когда $|\Delta \mathbf{x}| \approx c |\Delta t|$, условия $\Delta s_{ik} < l_0$ выполняются даже в том случае, если пространственные интервалы $\Delta \mathbf{x}_{ik}$ и временные интервалы Δt_{ik} по отдельности очень велики (много больше l_0 , рис. 27). Однако в полевые уравнения форм-факторы всегда входят лишь через интегральные выражения; можно показать (см., например, [19, 20]), что для очень широкого класса функций относительный вклад узкой области вблизи светового конуса в этих выражениях экспоненциально затухает по мере увеличения $|\Delta \mathbf{x}|$ и $|\Delta t|$ *.

Конечно, требование релятивистской инвариантности, оправданное в области больших масштабов, вообще говоря, совер-

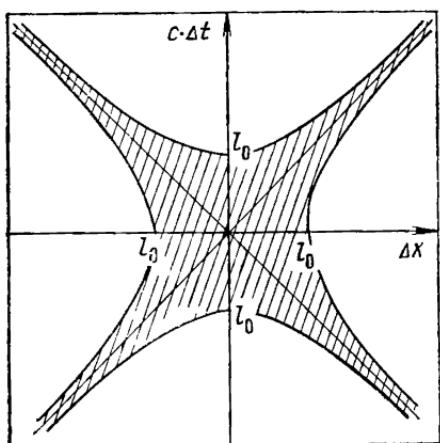
Рис. 27. В заштрихованной области $\Delta s^2 = |\Delta \mathbf{x}|^2 - c^2 |\Delta t|^2 < l_0$. На световом конусе увеличение $|\Delta \mathbf{x}|$ компенсируется ростом $|\Delta t|$, и разность Δs^2 остается меньше l_0

шенно не обязательно для масштабов, меньших l_0 ; однако если не вводить этого ограничения **, то из-за произвола в выборе функции G результаты расчетов оказываются настолько неопределенными, что теория становится практически бессодержательной. Это обстоятельство является одним из наиболее слабых пунктов нелокальной теории.

Можно ввести нелокальность в теорию, предположив, что операторы поля и координаты x_μ не коммутируют между собой подобно тому, как это имеет место для операторов импульса и координат, поэтому возможность одновременного и сколь угодно

* Для этого достаточно, чтобы все производные фурье-компоненты G были ограниченными функциями, что представляет собой довольно слабое ограничение.

** Это ограничение в значительной степени является формальным, поскольку в области (45) допускаются сверхсветовые скорости сигналов



точного измерения поля и координаты оказывается ограниченной «соотношением неопределенности» $\Delta A(x) \Delta x_\mu \geq l_0$, а понятие поля в точке теряет свое обычное физическое содержание: поле A оказывается *нелокальным*, размазанным в окрестности точки x .

Были попытки построить нелокальную теорию с помощью высших производных, введенных в уравнения движения или в функцию Лагранжа, путем вероятностного усреднения метрики в ультрамальных областях пространства — времени и т. д. Однако во всех случаях отказ от точечности события приводил к появлению в теории тех или иных обрезающих форм-факторов — либо в вершинных функциях, описывающих акт взаимодействия, либо в функциях распространения, описывающих передачу взаимодействия внутри области (45)* [7—9, 13—15, 21, 22]. В пространстве импульсов этому соответствуют релятивистски-инвариантные форм-факторы $\mathcal{F}(\Delta^2)$, зависящие от квадрата разности четырехмерных импульсов $\Delta = p - q$. Эти форм-факторы обращаются в нуль для больших значений импульсов $|p|, |q| > \hbar/l_0$ и обеспечивают сходимость выражений для масс, магнитного момента и других величин, принимающих бесконечно большие значения в локальной теории.

Возможность «подавить» вклад очень больших значений импульсов, участвующих во взаимодействиях промежуточных виртуальных частиц, и явилась исторически исходной причиной разработки нелокальной теории. Нелокальный подход был предложен в начале 30-х годов Г. В. Ватагиным [23, 24], однако серьезно исследоваться он стал лишь значительно позднее — начиная с середины 40-х годов [20—22, 25 и др.]. Интерес к нелокальным теориям был вызван не только тем, что они могли помочь устраниТЬ расходимости из теории поля; можно было рассчитывать также получить с помощью нелокальных теорий представление о том, к чему могут привести отклонения от законов теории относительности в области очень малых масштабов**.

Однако вскоре после первых обнадеживающих успехов многими авторами было показано, что введение нелокальности буквально разрушает основы современной теории поля и ведет к чрезвычайно серьезным трудностям: внутренне-противоречивым становится уравнение Шредингера и условия его интегрируемости оказываются нарушенными (см. [8, 9]), не выполняется требование уни-

* Можно предположить, что форм-фактор G не только зависит от инвариантов Δs^2_{ik} , но также содержит некоторый дополнительный четырехмерный вектор P . С помощью векторов P и $x_i - x_k$ можно построить релятивистские инварианты, которые в отличие от Δs^2_{ik} не обращаются в нуль на световом конусе. Область нелокальности в этом случае целиком сосредоточена в вершине — так, как это показано на рис. 26.6 [6, 7, 9]. Однако введение дополнительного вектора в аппарат современной теории, когда смешиваются конфигурационные и импульсные переменные, представляется весьма непоследовательной, искусственной операцией, фактически превращающей теорию в набор рецептов по вычислению матричных элементов.

** Теорию с нелокальным взаимодействием можно также рассматривать как феноменологическую формулировку идеи о тахионах (см. § 22).

тарности, вследствие чего вероятность одного и того же процесса может быть различной в различные моменты времени, не удается гарантировать исчезающую малую вероятность акаузальных эффектов на макроскопических расстояниях $\Delta x \gg l_0$, $\Delta t \gg l_0/c$ и т. д. Этот перечень далеко не исчерпывает всех трудностей, связанных с нелокальностью. Потребовались многие годы, чтобы обойти или в какой-то степени ослабить эти затруднения.

Оказалось, что многие из ранее обнаруженных трудностей не являются органически присущими нелокальной теории, а скорее обусловлены неудачным выбором ее формы. Удалось построить нелокальные схемы, по внешнему виду хотя и весьма искусствен-

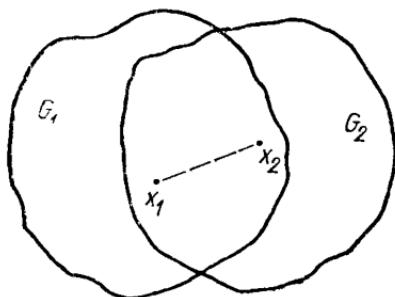


Рис. 28. В пересечении двух областей нелокальности, определяемых форм-факторами G_1 и G_2 , происходит передача сигнала со сверхзвуковой скоростью между точками x_1 и x_2 . Переходом к движущейся системе координат интервалы $\Delta x = x_1 - x_2$ и $\Delta t = t_2 - t_1$ можно сделать сколь угодно большими

ные, тем не менее не содержащие внутренних противоречий, если не считать очень сложной проблемы причинности, которая до сих пор еще не нашла удовлетворительного решения.

Проблема причинности, а точнее говоря, условие, обеспечивающее выполнение известной формулировки причинности в интервалах, меньших l_0 , занимает в настоящее время центральное место в обсуждениях преимуществ и недостатков различных нелокальных подходов. Как уже отмечалось, формальная релятивистская инвариантность теории сама по себе еще недостаточна для того, чтобы сделать теорию каузальной даже в очень больших, макроскопических областях пространства — времени: для устранения акаузальных эффектов на световом конусе требуется еще дополнительное ограничение вида форм-факторов. Макроскопические акаузальные эффекты могут возникать также вследствие того, что в теории нет ограничения на взаимное расположение областей нелокального взаимодействия. Такие области, каждая из которых определяется своим форм-фактором G , могут наложиться друг на друга, и между ними будет происходить обмен сигналами со сверхсветовыми скоростями. Поскольку расстояния между областями не связаны с каким-либо обрезающим форм-фактором, простым переходом к новой системе координат микроскопическое нарушение причинности можно превратить в макроскопический эффект. Эти соображения часто используются как аргумент против нелокальных теорий.

Нетрудно, однако, убедиться в том, что вероятность акаузальных событий при этом уменьшается во столько же раз, во сколько увеличивается расстояние между рассматриваемыми областями [26]. Действительно, пусть Δx и Δt — пространственное расстояние и сдвиг во времени между двумя точками, обменявшимися сверхсветовым сигналом (рис. 28), тогда в новой системе координат, движущейся с относительной скоростью u , расстояние между точками

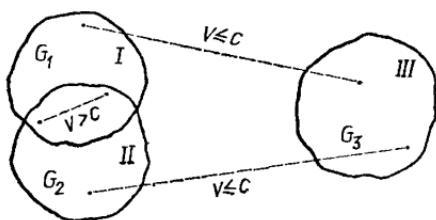
$$\Delta x' = (\Delta x - u\Delta t)\gamma = \Delta x(1 - u/c)\gamma, \quad (49)$$

где

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}; \quad v = \Delta x/\Delta t.$$

Если скорость сигнала $v \gg c$, а скорость движущейся системы координат $u \rightarrow c$, то расстояние, на которое распространится акаузальность

Рис. 29. Область III удалена на макроскопическое расстояние от обменивающихся сверхсветовыми сигналами областей I и II. Между областями III и областями I и II могут передаваться лишь сигналы со скоростями $v \leq c$. Благодаря взаимному обмену сигналами все три области связаны в единое целое



узальное взаимодействие в новой системе координат, составляется $\Delta x' \approx \gamma \Delta x$. Но вместе с тем из-за эффекта релятивистского растяжения времени первоначальная частота акаузальных событий N уменьшается в движущейся системе координат в γ раз:

$$N' = N/\gamma = N\Delta x/\Delta x' \quad (50)$$

и становится исчезающе малой по мере возрастания расстояния.

Значительно более серьезной является другая трудность, связанная с акаузальным взаимодействием в пересечении областей нелокальности [27]. Если число таких областей больше двух (на языке теории возмущений это означает, что рассматриваются эффекты третьего и более высокого порядков по константе связи), то в матричные элементы, которые содержат интегралы по всем значениям пространственно-временных координат, дают вклад конфигурации типа изображенной на рис. 29. Эти конфигурации распространяются на макроскопические расстояния и в то же время неустранимым образом содержат непричинные эффекты в пересечении областей I и II*.

* Математически наличие таких конфигураций проявляется в том, что в матричные элементы наряду с функцией \mathcal{D}_c , описывающей каузальные сигналы (см. § 10), входят также другие функции, отвечающие обмену виртуальными частицами с отрицательной энергией.

В настоящее время известны нелокальные модели, в которых ценой весьма специфической формулировки исходных соотношений удалось устраниТЬ все противоречия, связанные с перекрытием областей нелокальности, по крайней мере, для процессов с участием четырех частиц в конечном и начальном состояниях (так называемых четыреххвосток). Исследование более сложных матричных элементов представляет собой очень сложную математическую задачу.

В других нелокальных моделях вклад акаузальных эффектов выражается в виде ряда по степеням очень малой постоянной взаимодействия. Каждый следующий член этого ряда приводит к акаузальным эффектам в области с радиусом, большим, чем для предыдущего члена, и в пределе, когда рассматривается весь ряд, акаузальные эффекты распространяются на все пространство. Однако вследствие того, что постоянная взаимодействия мала, вклад старших членов ряда быстро убывает и в макроскопических областях акаузальные эффекты остаются, по-видимому, пренебрежимо малыми. Понятно, что такой вариант теории имеет пока всего лишь методическое значение, так как в действительности постоянные мезон-барионных взаимодействий много больше единицы и никакие разложения в ряд по их степеням невозможны.

В целом задача «макроскопически каузальной» формулировки теории нелокального взаимодействия еще далека от своего решения.

Следует также иметь в виду, что трудности с нарушением причинности в макроскопических областях пространства — времени представляют собой только один аспект проблемы, другой ее аспект касается каузальной обусловленности явлений внутри самой области нелокальности. В философской и особенно в физической литературе обычно как о само собой разумеющемся пишут о том, что постулат локальности не отделим от требования макропричинности, а введение нелокальных взаимодействий приводит к заведомо акаузальной теории. Создается впечатление, что тем самым допускается возможность существования в природе беспричинных, самопроизвольных и ничем не обусловленных явлений. Тот факт, что подобные явления локализованы в области ультрамалых пространственно-временных масштабов, не меняет дела: мы соглашаемся с тем, что принцип причинности не универсален.

Некоторые авторы пытаются спасти положение путем утверждения о том, что в нелокальных теориях микропричинность следует заменить более общей категорией — взаимодействием, которая отражает объективную связь явлений без разделения ее на причину и следствие при условии, когда изменение одного из явлений неминуемо сопровождается изменением другого. Причинность при этом фактически понимается как взаимообусловленность взаимодействующих событий. Однако такой подход представляет собой всего лишь пожелание, поскольку формализм нелокальных теорий не включает в себя каких-либо соотношений или величин,

выражающих или явно учитывающих приведенные выше утверждения: нелокальные теории не содержат никаких запретов или ограничений на применение известной формулировки микропричинности. Самым слабым пунктом всех нелокальных теорий является то, что введение радикального нового элемента — сверхсветовой скорости — не сопровождается каким-либо изменением остального физического базиса современной теории поля.

Устранить принципиальную трудность нарушения причинности в нелокальных теориях можно только путем перехода к более совершенной теории с новым понятийным аппаратом; современные же нелокальные схемы следует рассматривать лишь как грубо приближенные, модельные попытки выяснить, к чему приводит на макроскопических расстояниях введение сверхсветовых сигналов в области нелокальности (45). Вопрос же о явлениях внутри самой этой области находится за пределами модели*. Вполне возможно, что ответ на этот вопрос будет связан с каким-то обобщением известных нам релятивистских преобразований, при котором временная упорядоченность событий, а следовательно, и привычная для нас форма причинной связи в определенном смысле могут иметь место и при наличии сверхсветовых сигналов. Пока это — область догадок, однако подобная точка зрения представляется более вероятной, чем простая экстраполяция релятивистских соотношений в область ультрамалых пространственно-временных масштабов. Скорее всего такую экстраполяцию можно рассматривать лишь как очень грубую, предварительную разведку границ возможных отклонений от современной теории.

Некоторые авторы интерпретируют нелокальность как учет протяженности элементарных частиц. Однако введенная таким образом «жесткая» протяженность частиц принципиально отличается от их протяженности, наблюдаемой в экспериментах (см. § 4). Последняя представляет собой сложный эффект виртуальных полей, она не связана с введением какой-либо новой универсальной постоянной, хорошо описывается релятивистски-инвариантными выражениями и не содержит указаний на сверхсветовые скорости сигналов. Феноменологически такую протяженность следовало бы описывать «динамически деформируемыми» форм-факторами, которые изменялись бы под влиянием внешних воздействий и соответственно сами подчинялись бы специальным уравнениям движения [6, 22]. С точки зрения пространственно-временных представлений использование динамически деформируемых форм-факторов по существу представляет собой один из вариантов локальной теории.

* Нельзя не согласиться с замечанием М. А. Маркова [6, с. 189] о том, что современные способы введения нелокальности фактически имеют лишь негативный характер: они выделяют область, где современная теория несправедлива, но очень мало говорят о физических законах внутри этой области. Такая концепция должна быть дополнена ни больше, ни меньше, как теорией, справедливой в области $\Delta x \lesssim l_0$, $\Delta t \lesssim l_0/c$.

К сожалению, возможности введения динамически деформируемых форм-факторов весьма ограничены. Их можно ввести только при упругом рассеянии частиц, да и то лишь для сравнительно небольших передаваемых импульсов. В других случаях для феноменологического описания процессов, как правило, требуется большое число значительно более сложных функций.

Несмотря на принципиальные трудности «строгой» нелокальной теории многие авторы предпринимали попытки обнаружить элементарную длину l_0 непосредственным сравнением с опытом различных выражений локальной теории, в которые введены феноменологические форм-факторы. По-видимому, наиболее корректную оценку значения l_0 в настоящее время можно получить с помощью дисперсионных соотношений, при выводе которых учитывается нелокальность. Эти соотношения отличаются от локальных дисперсионных соотношений (33) дополнительными членами d_i в своих правых частях [7]:

$$\mathcal{D}_{\pm}(E)_{\text{нелок}} = \mathcal{D}_{\pm}(E)_{\text{лок}} + d_1(E) \pm d_2(E); \quad (51)$$

$$d_1(E) = \frac{k^2 l_0}{4\pi \sqrt{1 + m^2 l_0^2}} \mathcal{F}(E) [\sigma^*_+ + \sigma^*_-],$$

$$d_2(E) = -\frac{k^2 E l_0^3}{1 + m^2 l_0^2} \mathcal{F}(E) (\mathcal{D}^*_+ + \mathcal{D}^*_-),$$

где k — импульс мезона; $E = \sqrt{k^2 + m^2}$ — его энергия; \mathcal{D}^*_{\pm} — действительные части амплитуды упругого рассеяния, а σ^*_{\pm} — полные сечения ($\pi^{\pm} - p$)-взаимодействия при энергии $E = 1/l_0$ (постоянные \hbar и c положены равными единице); \mathcal{F} — форм-фактор в импульсном представлении, например

$$\mathcal{F}(E) = 1/[1 + E^2 l_0^2]. \quad (52)$$

Сравнение с экспериментальными значениями $\mathcal{D}_{\pm}(E)$ показывает, что в пределах погрешности измерений, входящих в дисперсионные соотношения величин, нелокальные добавки d_1 и d_2 не отличаются от нуля, т. е. $l_0 < 10^{-15}$ см. Никаких отклонений от экспериментальных данных не обнаружено и при рассмотрении других нелокальных выражений*.

* Используя эффект Мёссбауэра, можно экспериментально зафиксировать относительное изменение ширины линий в спектре γ -излучения $\Delta E/E \sim 10^{-16}$. Такая высокая точность послужила основанием использовать этот эффект для оценки верхнего предела значения постоянной l_0 [28, 29]. Однако, как было показано в [30] на примере весьма общих нелокальных моделей, введение микроскопических сверхсветовых сигналов в действительности не должно приводить к каким-либо уширениям спектральных линий. В процессе распространения излучения спектральный состав не изменяется, если энергия электромагнитной волны меньше критического значения $E_0 = \hbar c/l_0$. Поскольку из дисперсионных соотношений и других данных по физике высоких энергий следует, что $l_0 \lesssim 10^{-15}$ см, то $E_0 \gtrsim 15$ ГэВ, а это намного превосходит энергию γ -излучения в опытах с эффектом Мёссбауэра. Другими словами, из факта существования узких спектральных линий нельзя сделать надежный вывод о верхнем пределе элементарной длины l_0 .

Итак, попытки обобщения известных пространственно-временных представлений на основе идеи нелокальности оказываются пока безрезультатными. Основной недостаток такого подхода заключается в том, что сейчас неизвестно, как определить значение элементарной длины l_0 или, в более общем случае, вариант нелокальной теории. Фактически мы лишь требуем, чтобы все эффекты, связанные с нелокальностью, были за пределами точности современных экспериментов, которые не противоречат локальной теории. Трудно освободиться от чувства, что все рассматривавшиеся до сих пор варианты нелокальных схем весьма далеки от истины, им не хватает главного — руководящей физической идеи; по существу это — исследование несколько новой математической формы со старым физическим содержанием. Именно поэтому нелокальные схемы значительно уступают локальной теории поля в простоте и прозрачности своих оснований. Как правило, нелокальные построения имеют пока еще весьма искусственный, рецептурный характер.

Нелокальность тесно связана с так называемыми неренормируемыми теориями. Еще в середине 30-х годов Гейзенберг разделил все полевые теории в зависимости от типа взаимодействия на два существенно различных класса. Теории первого класса (например, квантовая электродинамика) характеризуются безразмерной постоянной связи, сечения различных физических процессов в таких теориях остаются ограниченными при увеличении энергии взаимодействующих частиц, так что перенормировкой конечного числа постоянных (в случае электродинамики — заряда и массы частиц) теорию можно сделать свободной от расходимостей [1, с. 239, 240]. Такие теории принято называть ренормируемыми. В другом классе — у неренормируемых теорий — постоянные взаимодействия имеют размерность некоторой степени длины, матричные элементы различных процессов неограниченно возрастают при увеличении энергии, для их регуляризации требуется бесконечно большое число перенормировок. Примером теории такого класса может служить хорошо известная четырехфермионная теория слабых взаимодействий.

Для регуляризации теорий второго класса в лагранжиан взаимодействия приходится вводить бесконечное число контрчленов с высшими производными, которые в сумме можно рассматривать как разложение некоторого форм-фактора, описывающего нелокальное взаимодействие. Образно говоря, лагранжианы неренормируемых теорий представляют собой как бы «обломки» характеристик нелокальных взаимодействий, представленных в локализованном виде [1, с. 238].

Если интересоваться эффектами при не слишком высоких энергиях, когда основной вклад дают взаимодействия на больших расстояниях, то подобную нелокальность можно не учитывать, и результаты, например, четырехфермионной теории слабых взаимодействий, полученные с помощью теории возмущений, хорошо со-

гласуются с опытом. Однако при переходе к энергиям $E \gtrsim \hbar c/l_0$, где $l_0 = \sqrt{G/\hbar c} = 7 \cdot 10^{-17}$ см ($G = 1,4 \cdot 10^{-49}$ эрг/см³ — постоянная слабых взаимодействий), т. е. в области $E \gtrsim 300$ ГэВ в системе центра масс*, резко возрастает и становится преобладающим вклад высших членов ряда теории возмущений и взаимодействие из слабого фактически превращается в сильное. Для получения физически осмысленных результатов в этом случае необходимо феноменологически ввести обрезающие форм-факторы (при этом возникает множество трудностей) или перейти к какой-то более общей теории, например к предложенному Вайнбергом и Саламом варианту, в котором четырехфермионное взаимодействие рассматривается как приближенное объединение в один «узел» двух трехчастичных взаимодействий — акта испускания и акта поглощения тяжелого промежуточного бозона двумя взаимодействующими фермионами. Масса этого бозона M составляет несколько десятков гигаэлектронвольт **, поэтому в опытах с частицами, длина дебройлевской волны которых $\lambda > \hbar/Mc \sim 10^{-15} \div 10^{-16}$ см, структура взаимодействия «не прощупывается» и это взаимодействие предстает перед нами как взаимодействие четырех частиц в одной пространственно-временной точке. С точки зрения такой теории «нелокальная структура» слабых взаимодействий представляет собой суперпозицию локальных взаимодействий некоторых промежуточных полей, подобно тому как внутреннюю структуру элементарных частиц, аппроксимировавшуюся первоначально «жесткими» форм-факторами, считают сейчас результатом виртуальных взаимодействий.

Последующие исследования показали, что рассмотрение неренормируемых теорий как нелокальных требует уточнения еще и в другом смысле. Дело в том, что среди различных типов неренормируемых теорий наряду с существенно нелокальными теориями имеются также такие, из которых однозначно можно выделить определенную локальную часть, удовлетворяющую всем аксиомам

* В лабораторной системе координат это соответствует $2 \cdot 10^5$ ГэВ в случае столкновения двух электронов и $3,5 \cdot 10^8$ ГэВ для столкновения двух нуклонов.

** Массу промежуточного бозона можно оценить, если воспользоваться соотношением неопределенностей $\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$, где положить $\Delta x \sim 10^{-15} \div 10^{-16}$ см: $M = c \Delta p \sim \hbar c / \Delta x \approx 30 \div 300$ ГэВ. Для рождения таких мезонов в свободном виде нужны пучки частиц очень большой энергии.

В теории Вайнберга — Салама используются два промежуточных бозона: заряженная частица W^\pm с массой $M \approx 40$ ГэВ и нейтральная частица Z^0 с массой $M \approx 80$ ГэВ. Слабые взаимодействия при этом оказываются настолько похожими на электромагнитные, что можно рассматривать эти два типа взаимодействий как частные случаи взаимодействия фермиона с бозоном, одним состоянием которого является фотон (промежуточный бозон нулевой массы), а тремя другими состояниями — бозоны W^\pm и Z^0 . В такой «единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий» имеет место взаимная компенсация неренормируемых членов, и теория становится ренормируемой.

Теория Вайнберга — Салама предсказывает ряд новых эффектов, в частности так называемые нейтральные токи, обусловленные обменом Z^0 -частицей. Недавно такие токи были обнаружены экспериментально.

обычной теории поля, а оставшиеся нелокальные добавки отбросить на основании дополнительных соображений. При этом устраются все расходящиеся выражения и в то же время результаты расчетов не содержат какой-либо «обрывающей длины» (см., например, [13, 32]). Здесь имеются интересные возможности для дальнейших исследований.

Другим направлением обобщения современной локальной теории является учет нелинейных эффектов. Как и нелокальность, эти эффекты предполагаются существенными лишь в области небольших пространственно-временных интервалов, где поля могут достигать очень больших значений, в обычных же условиях нелинейные добавки остаются чрезвычайно малыми. Например, в часто рассматриваемом обобщении уравнения Клейна — Гордона

$$\sum_{\mu=1}^4 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_{\mu}^2} - \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \varphi - \lambda \varphi^3 = 0 \quad (53)$$

нелинейный член $\lambda \varphi^3$ должен быть значительно меньше предыдущего члена. Отсюда сразу же следует ограничение на поле, при котором теорию можно еще по-прежнему считать линейной:

$$\varphi_{\max} \ll \frac{mc/\hbar}{\sqrt{\lambda}}, \quad (54)$$

где величина $l_0 = 1/\sqrt{\lambda}$ имеет размерность длины и представляет собой новую универсальную постоянную. Этот результат имеет общее значение: нелинейные обобщения локальных теорий всегда связаны с введением некоторой элементарной длины l_0 , определяющей область пространственно-временных масштабов, где теория становится существенно нелинейной.

Следует заметить, что при рассмотрении нелинейных обобщений речь не идет о той «естественной» нелинейности, например рассеянии света на свете, которая возникает в современной локальной теории поля из-за взаимодействия с промежуточными виртуальными частицами. По своему происхождению такая нелинейность подобна динамически деформируемым форм-факторам в нелокальной теории и не связана с какой-либо новой мировой постоянной; λ в этом случае выражается через уже известные универсальные постоянные и связана с «классическим радиусом» частиц e^2/mc^2 или с их комптоновской длиной волны h/mc .

Для того чтобы выяснить, с какими скоростями сигналов связаны нелинейные теории, необходимо рассмотреть скорость перемещения фронта волны, описываемой уравнением (53) или другим аналогичным релятивистски-инвариантным по форме нелинейным уравнением. Используя известные формулы теории дифференциальных уравнений, нетрудно показать (этот вопрос подробно рассмотрен в монографии [7]), что в зависимости от конкретного вида нелинейных добавок фронт волны может перемещаться как

со скоростями $v \leq c$, так и со сверхсветовой скоростью. В первом случае теория релятивистски-инвариантна, во втором, как и в обсуждавшейся выше нелокальной теории, релятивистская инвариантность выполняется лишь формально.

Вариантам нелинейной теории со сверхсветовыми скоростями сигналов свойственны, в общем, те же трудности, что и нелокальной теории (в частности, связанные с причинностью). Кроме того, для теорий с нелинейными членами возникает очень сложная проблема квантования. При обычных способах квантования нелинейное поле не разлагается на систему гармонических осцилляторов (плоских волн), каждый из которых соответствует независимой частице со своим значением импульса. Энергию нелинейного поля не удается представить в виде суммы энергий отдельных частиц и энергии вакуума. Бесконечная энергия вакуума здесь оказывается неаддитивной и ее нельзя рассматривать как нулевой уровень.

В литературе описаны нелинейные модели, для которых удается обойти большинство перечисленных трудностей. Однако условия релятивистской инвариантности, причинности и другие общие требования никогда не анализировались в применении к нелинейным теориям так обстоятельно, как для теорий с нелокальным взаимодействием. Поэтому остается не ясным, будут ли справедливы при более тщательной формулировке основных постулатов нелинейной теории те результаты, которые получены для частных нелинейных моделей.

В теории нелокальных взаимодействий известно много примеров, когда более последовательная формулировка (например, учет многовременного формализма, см. § 9) полностью зачеркивала результаты более частных подходов.

Одно время нелинейной теории уделяли очень большое внимание в связи с надеждами построить единую полевую теорию «праматерии», из которой следовал бы весь спектр элементарных частиц с их квантовыми числами и вся динамика их движения. На моделях было показано, что в отличие от линейной теории, где масса, заряд и сами уравнения движения источников поля должны быть заданы, нелинейный подход, в принципе, позволяет получить эти данные как следствие единого исходного уравнения («уравнения праматерии»). Спектр частиц в этом случае возникает как спектр возбуждений в результате взаимодействия поля с самим собой и получается из решения задачи о собственных значениях. Что же касается уравнений движения отдельных частиц, то возможность их вывода продемонстрировали в своих классических работах Эйнштейн, Инфельд и Фок на примере нелинейного гравитационного поля. К сожалению, трудности на этом пути оказались настолько значительными, что все направление по существу не вышло за рамки начальной, весьма предварительной стадии расчетов [12, 14, 15, 33].

В последнее время нелинейные теории снова оказались в центре внимания физиков в связи с исследованием полей, переносящих

взаимодействие между кварками [95, 96]. Такие поля описываются нелинейными уравнениями, однако подобно гравитационным уравнениям Эйнштейна эти уравнения полностью релятивистски-инвариантны и не содержат скоростей сигналов, больших скорости света.

Остановимся еще на одном важном направлении попыток выйти за пределы традиционных пространственно-временных представлений. Речь идет о так называемом квантовании пространства и времени. Хотя эти работы остаются пока не более успешными, чем другие теоретические обобщения, связанные с ним идеи пространственно-временной дискретности представляются чрезвычайно интересными и многообещающими.

В своей простейшей форме идея дискретного пространства, состоящего из наименьших, не подлежащих дальнейшему делению объемов, пришла к нам из глубокой древности. Представление об амере — минимальном «атоме» пространства, лежащем в основе всех других многочисленных различающихся своими свойствами атомов вещества, занимало важное место уже в натурфилософской картине мира Демокрита, однако влияние этой идеи можно проследить и в более ранние периоды [34]. Проблеме дискретности пространства и времени посвящено большое число философских, математических и чисто физических исследований. Тем не менее до сих пор образ пространственного и временного квантов остается интригующей разум неподтвержденной, но и неопровергнутой догадкой.

Действительно, очень трудно согласиться с мыслью о том, что по мере перехода в область все более мелких пространственно-временных интервалов такое, казалось бы, весьма конкретное и специфическое свойство, как континуальная непрерывность, когда каждый элемент, возникающий в результате деления, обладает свойством дальнейшего деления в той же степени, что и более крупные элементы, будет оставаться неизменным, в то время как различные свойства материальных объектов будут подвержены дальнейшим все более глубоким качественным изменениям.

Вывод о возможном существовании некоторых минимальных пространственно-временных интервалов Δx и Δt получается уже в рамках обычной локальной теории, если предположить, что для очень малых интервалов, вплоть до 10^{-33} см и 10^{-43} сек, применимы квантовые соотношения неопределеностей, а скорость микросигналов ограничена (см. с. 179). Вместе с тем следует иметь в виду, что ограничение бесконечной делимости может произойти в форме, ничего общего не имеющей с теми примитивными представлениями об отдельных «кусочках», квантах пространства и времени, которые мы обычно имеем в виду, когда говорим о соотношении непрерывного и дискретного. Предположение о том, что известная нам абсолютная непрерывность «сменится» полной дискретностью, кажется таким же невероятным, как и допущение неограниченной делимости пространства — времени.

Нельзя не согласиться с С. Т. Мелюхиным, когда он подчеркивает, что «абсолютизация идеи квантования пространства и времени равносильна допущению последних бесструктурных «кирпичиков» материи, представляющих нижний предел сложности» [35, с. 148]. Однако С. Т. Мелюхин не прав, утверждая далее, что «материя должна быть непрерывной, поскольку предположение о ее дискретности вновь влечет за собой вопрос о характере взаимодействия между дискретными элементами, и, таким образом, старая проблема возникает в той же форме» [35, с. 149]. Этот вывод основан на очень частном представлении о свойстве дискретности и напоминает известный шутливый вопрос о том, что внутри кванта энергии и чем «склеены» его куски? Столь же неоправданным с точки зрения современной физики выглядит и утверждение о том, что «идея дискретности времени не может быть обоснована даже в логическом плане», так как «если допустить, что время абсолютно, прерывно и состоит из неделимых «квантов», то это будет означать, что материя то существует, то не существует, то снова существует и т. д., а это противоречит принципу ее несotворимости и неуничтожимости» [36, с. 36].

Квантование пространства — времени, даже в тех простых предварительных формулировках, которые известны современной теории, ничуть не противоречит принципу сохранения материи и не исключает ее количественной и качественной неисчерпаемости. (Кроме того, вводить какие-либо запреты для конкретных физических исследований на основе «очевидных» общефилософских положений всегда следует с исключительной осторожностью.

Несмотря на кажущуюся простоту самой исходной идеи дискретного пространства и времени ее последовательная теоретическая формулировка оказывается чрезвычайно трудной. Простейший способ введения минимальной длины l_0 в геометрию, когда пространственно-временное многообразие рассматривается как четырехмерная решетка, узлы которой могут принимать лишь значения, кратные l_0 , и дифференциальные уравнения движения заменяются уравнениями в конечных разностных [37], устраниет ряд расходимостей теории, однако релятивистски-неинвариантен, поскольку только в одной специальной системе координат — в системе самой решетки — преобразование узлов (группа симметрии решетки) приближенно совпадает с преобразованиями Лоренца; во всех других системах координат эти преобразования совершенно различны [7].

С большими трудностями связаны и более поздние варианты теорий квантованного пространства — времени, сформулированные в искривленном пространстве импульсов (с радиусом кривизны \hbar/l_0) [38, 39] или использующие пространства с конечным, но очень большим числом точек [40, 41].

В конечном счете трудности оказываются примерно такого же характера, как и в теориях с нелокальными и нелинейными эф-

фектами; это обусловлено тем, что во всех случаях в теорию вводится минимальная длина l_0 *.

Вместе с тем нельзя не отметить исключительное эвристическое значение идеи дискретного пространства и времени — одной из самых глубоких и дерзновенных догадок, пришедших к нам из древности.

§ 24. Макроскопические явления в микромире

Из глубокой древности пришла к нам и другая поражающая воображение идея: представление о множественности вложенных друг в друга, различающихся своими пространственно-временными масштабами миров. Еще в V в. до н. э. Анаксагор утверждал, что мир представляет собой совокупность бесконечного числа частиц «гомеомерий», каждая из которых в свою очередь состоит из неисчерпаемо огромного числа еще более мелких «геометрий» и т. д. без конца. При этом любая из этих частиц содержит в себе все свойства Вселенной, она бесконечно мала и бесконечно велика и подобно целому заключает в себе все существующее и сущее не просто бесконечно, но бесконечно бесконечно [44, с. 135; 45, с. 153]. По мнению Анаксагора, в каждой частице, какой бы малой она ни была, «есть города, населенные людьми, обработанные поля, и светит солнце, луна и другие звезды, как у нас» [46, с. 190]. Лейбниц в значительно более позднюю эпоху также считал, что в каждой «наименьшей части материи существует целый мир созданий, живых существ, животных, энтелехий». По его мнению «<...>, всякую часть материи можно представить наподобие сада, полного растений, и пруда, полного рыб. Но каждая ветвь растения, каждый член животного, каждая капля его соков есть опять такой же сад и такой же пруд» [47, с. 357]. Аналогичные мысли высказывали Дж. Бруно, французские энциклопедисты и другие выдающиеся мыслители.

Быстрое развитие экспериментального естествознания в XIX—XX в., открытие молекул, атомов, распадающихся и превращающихся одна в другую элементарных частиц, казалось бы, неопровергимо доказало абсолютную фантастичность такой наивной картины Мира, построенного по примеру вкладывающихся друг в друга матрешек. Однако в последнее время появились соображения, которые неожиданно заставляют нас в некотором смысле вернуться к представлению о Вселенной как о совокупности бесконечно

* Введение минимальной длины приводит к большим трудностям и с точки зрения оснований математики. Отмечавшая еще Аристотелем («Введение самой маленькой величины расщепляет самые великие основы математики» [42, с. 400]) пропасть между областью дискретного и областью непрерывного, между арифметикой и геометрией, и в настоящее время представляет собой, пожалуй, одну из основных и наиболее сложных концептуальных проблем математики (см., например, [43]).

большого числа последовательно вложенных друг в друга миров. Речь идет о так называемых *замкнутых* и *полузамкнутых* мирах [48—53].

Еще в 1922 г. А. А. Фридман показал, что гравитационные уравнения общей теории относительности имеют решение, описывающее бесконечный, но внутренне замкнутый мир [54, 55]. Пояснить такую возможность проще всего на примере трехмерной сферы радиуса R . Поверхность такой сферы, изображенной на рис. 30, представляет собой двумерный замкнутый и в то же время бесконечный (не имеющий нигде границ) мир.

Как и в плоском, неискривленном пространстве, окружностями в двумерном сферическом мире являются кривые, все точки которых равноудалены от некоторой произвольно выбранной точки 0. При удалении от этой точки (т. е. при увеличении радиусов окружностей $\rho = \rho \chi$, где χ — азимутальный угол в трехмерном пространстве) длина окружностей сначала возрастает до максимального значения $s = 2\pi R$ при $\rho = \pi R/2$, а затем уменьшается до нуля при наибольшем возможном в данном мире радиальном расстоянии $\rho = \pi R$.

Мир Фридмана аналогичен рассмотренной модели с тем отличием, что если бы для наглядности мы хотели сопоставить ему определен-

Рис. 30 Двумерный замкнутый бесконечный мир на поверхности сферы:

C, C', C'' — окружности вокруг произвольной точки 0; ρ, ρ', ρ'' — их радиусы, величина $\rho = \rho \chi$ изменяется в пределах $0 \div \pi R$

ный геометрический образ, нам бы пришлось сказать, что этот мир представлят собой замкнутую, но не имеющую нигде границ *трехмерную* поверхность четырехмерной сферы радиуса R в некотором воображаемом четырехмерном пространстве*.

«Радиус мира» R определяется уравнениями общей теории относительности в зависимости от плотности массы в этом мире (в модели Фридмана плотность массы предполагается полностью

* Следует подчеркнуть, что четвертая координата в этом воображаемом мире x_4 имеет такой же смысл пространственной переменной, как и три другие координаты x_1, x_2 и x_3 . Трудности в понимании модели Фридмана часто объясняются тем, что координате x_4 придают смысл времени. В действительности, рассматриваемое четырехмерное пространство имеет лишь иллюстративное, вспомогательное значение и его нельзя отождествлять с четырехмерным пространством — временем. Время считают постоянным, т. е. рассматривают как бы мгновенную фотографию пространства. Это хорошо видно также на более простом примере (см. рис. 30).

однородной и изотропной по всем направлениям, т. е. в каждый момент $t(x)$ метрика во всем пространстве одна и та же} и от скорости разлета вещества в некоторый «начальный» момент (см. об этом ниже). Если скорость разлета вещества мала, то, как и в рассмотренной двумерной модели, расстояние по «прямой» (по лучу света) на поверхности четырехмерной сферы $\rho=\pi\chi$, где χ — азимутальный угол в четырехмерном пространстве (см. рис. 30), может изменяться лишь в пределах от нуля до максимального значения $\rho=\pi R$.

Соответственно поверхность трехмерной пространственной сферы радиуса ρ , измеряемая в один и тот же момент t на разных расстояниях от произвольно выбранной точки 0, возрастает до своего максимального значения $S=\pi R^2$ при $\rho=\pi R/2$, а затем стягивается в точку при $\rho=\pi R$.

Поскольку во все релятивистские соотношения пространственные и временная координаты входят совершенно равноправно, следует ожидать, что мир Фридмана конечен не только в пространстве ($\rho \leq \pi R$), но и во времени ($t \leq T$). Действительно, рассчитанный с помощью уравнений Эйнштейна радиус мира R оказывается зависящим от времени, возрастаю от нуля до некоторого наибольшего значения R_{\max} и снова стягиваясь в точку. Другими словами, Вселенная с однородным распределением массы представляет собой нестационарное, пульсирующее (то расширяющееся, то сжимающееся) образование*.

Рассматривавшаяся первоначально как чисто математическая возможность, заложенная в уравнениях общей теории относительности, теория расширяющейся Вселенной Фридмана вскоре получила убедительное экспериментальное подтверждение в обнаружении красного смещения светового излучения разбегающихся галактик, а затем и в открытии так называемого реликтового излучения — потока фотонов, образовавшихся еще на первом этапе развития нашей Вселенной, когда она была сконцентрирована в относительно небольшом объеме и плотность вещества в ней значительно превышала современную. И хотя соответствие модели Фридмана пространственно-временной структуре нашей метагалактики во многом остается еще не ясным (в частности, не ясна дальнейшая судьба Метагалактики: будет она сжиматься или же скорость разлета вещества при первоначальном взрыве была такова, что система будет продолжать неограниченно расширяться в пространстве и во времени — этот и ряд других сложных вопросов еще предстоит выяснить), основной момент теории — начальный взрыв «звездного правещества» — конечное число лет тому

* Такой временной режим имеет место только при условии малых начальных скоростей разлета вещества. При больших скоростях мир расширяется до бесконечности [54, 55].

назад и последующее его расширение — не вызывает сейчас сомнений*.

Не будем обсуждать сложные космологические вопросы (подробнее они изложены, например, в монографии Я. Б. Зельдовича и И. Д. Новикова [56]), для нас сейчас важна сама принципиальная возможность существования замкнутого мира.

Замечательно, что такой замкнутый мир может образоваться из вещества любой сколь угодно малой или большой массы M_0 , если плотность вещества в мире, соответствующая моменту его максимального расширения, достигает «критического значения»

$$d \geq d_{\text{кр}} = \frac{2}{M_0} \left(\frac{3c^2}{4\pi} \right)^3 = \frac{3}{8\pi} \frac{c^2}{\kappa R_{\text{макс}}^2}, \quad (55)$$

где κ — гравитационная постоянная [49]. Гравитационный дефект масс ΔM при этом будет в точности равен суммарной массе отдельных частей системы $M_0 = \int_V d(x) d^3x$, а полная масса системы

$M = M_0 - \Delta M$ и ее внешний радиус R обратятся в нуль.

Вместе с тем внутренние размеры системы $R(t) \leq R_{\text{макс}}$ линейно зависят от массы M_0 и при достаточно больших значениях M_0 могут стать сколь угодно большими (космическими). Например, замкнутый мир с массой, равной массе Солнца, имеет радиус всего лишь около 300 м, в то время как размер замкнутого мира с массой, близкой к массе известной нам части Вселенной, составляет уже около 10^{23} — 10^{24} км.

Если масса, а следовательно, и радиус мира R очень велики, то его свойства практически не отличаются от свойств «плоского», не обладающего кривизной мира. Его жители не будут даже подозревать о замкнутости своего мира, о том, что кроме этого кажущегося им бесконечным мира имеется еще множество других похожих миров. Такие замкнутые миры могут существовать независимо один от другого. Для живущих в них существ каждый из этих миров будет всей Вселенной, а другие миры будут просто не наблюдаемы — как будто их вообще не существует в природе. Замкнутый мир полностью выпадает из причинно-следственных связей других миров (если только не предполагать передачи сигналов с помощью, например, тахионов или какие-нибудь еще выходящие за рамки современного эксперимента возможности).

* Понятно, что о конечном времени жизни Вселенной можно говорить лишь весьма условно, пользуясь пространственно-временными понятиями, пригодными для очень больших расстояний и длительностей. Для очень малых интервалов Δt , где существенны квантовые, а возможно, и какие-то другие специфические закономерности, применение этих понятий просто незаконно. Пространство и время могут претерпеть здесь такие существенные изменения, что потеряет смысл само современное представление о бесконечности. То же самое можно сказать и о стягивании Вселенной в «точку».

Никакой связи между замкнутыми мирами нет. Они не могут ни пересечься, ни соприкоснуться между собой — просто принадлежат различным трехмерным пространствам. Решения Фридмана описывают многосвязную Вселенную, состоящую из множества трехмерных миров, живущих в своем собственном ритме времени. По отношению ко всем остальным каждый из этих миров представляет собой «абсолютное ничто», точку, лишенную размера, массы и всех других физических свойств.

При каких условиях может произойти процесс пространственно-временного «самозамыкания» вещества?

Если масса тела велика, то растягивающее действие излучений и мощных потоков вещества, порожденных ядерными реакциями в недрах этого тела, может оказаться недостаточным для того, чтобы противостоять стягивающим силам гравитационного притяжения. Тело начнет сжиматься; причем для M_0 , большей нескольких солнечных масс, такое сжатие, однажды начавшись, уже не сможет прекратиться.

Тем не менее сжатия тела в точку и полного «выпадения» его из внешнего пространства — времени все же не произойдет. Уменьшение размеров тела сопровождается нарастанием сил гравитационного притяжения на его поверхности, которые становятся настолько большими, что их уже не может преодолеть ни свет, ни другие виды излучений. Коллапсирующее тело превращается в черную дыру. Все, что происходит внутри этого объекта, остается неизвестным внешнему миру*.

Радиус черной дыры пропорционален исходной массе тела:

$$R_{\text{ч.д.}} = 2\kappa M_0 / c^2 \quad (56)$$

(эту величину часто называют «гравитационным радиусом» тела: $R_{\text{ч.д.}} = R_{\text{гр.}}$). Для тела с массой, равной трем массам Солнца, $R_{\text{ч.д.}} \approx 10 \text{ км}$. По астрономическим масштабам это уже почти точка, но до полного «схлопывания» пространства еще далеко.

Гравитационное поле тел, масса которых меньше полутора — двух масс Солнца, вообще недостаточно для того, чтобы «смять» внутренние силы, препятствующие сжатию. Поэтому 5—10 км — это минимальный радиус черной дыры, которая может образоваться в результате гравитационного коллапса. Изменение массы вещества при таком коллапсе сравнительно невелико: $\Delta M \ll M \sim M_0$.

Черные дыры с меньшими радиусами и плотностью замкнутые миры, когда $M=0$, могут образоваться лишь в катаклизме первичного взрыва, в условиях колоссальных перепадов давления и плотности.

* Согласно общей теории относительности (см., например, [56]) время сжатия коллапсирующей системы для внешнего (шварцшильдовского) наблюдателя равно бесконечности. По мере того как система превращается в черную дыру, скорость сигналов, поступающих из замыкающегося мира к внешнему наблюдателю, $v \rightarrow 0$, и система как бы «застывает» в глазах этого наблюдателя.

Рассуждения о гравитационном схлопывании физической системы требуют уточнения, если эта система имеет не равный нулю электрический заряд Q . В этом случае гравитационные уравнения приводят к следующему выражению для полной массы системы:

$$M = M_0 + M_Q - \Delta M = (1/\kappa) (V R^2 + 2M_0 \kappa R + Q^2 \kappa - R) \quad (57)$$

(M_Q — часть массы, обусловленная электромагнитными взаимодействиями). При уменьшении радиуса системы, $R \rightarrow 0$, это выражение, независимо от значения M_0 , стремится к одному и тому же отличному от нуля значению

$$M = Q / V \kappa, \quad (58)$$

а внутренняя метрика системы на ее «горизонте», вблизи точки полного замыкания, когда наибольшее возможное в данном мире радиальное расстояние $\rho \approx \pi R$ оказывается существенно нефридмановской: сфера $S = 4\pi R^2 \sin^2(\rho/R)$ теперь уже не стягивается в точку (теперь всегда $\rho < R$) и через поверхность минимальной площади, так называемую «горловину», метрика фридмановского мира переходит в метрику Шварцшильда — метрику точечной гравитирующей массы в пустом пространстве*. Электрические силовые линии, сгущаясь на границе внутреннего мира, не дают ему закрыться и через горловину уходят на шварцшильдовскую бесконечность [49]. Вместо «замкнутого мира» образуется «полузамкнутый мир», гравитационно и электрически взаимодействующий с окружающей Вселенной. В частности, если заряд Q равен заряду электрона, то для массы полузамкнутого мира получается значение

$$M = e / V \kappa \sim 10^{-6} \text{ г.} \quad (59)$$

По мнению некоторых авторов (см., например, [49, 50]) образование полностью замкнутого мира, по-видимому, невозможно также в случае, когда коллапсирующая физическая система имеет отличные от нуля барионное и лептонное числа, так как из мира в этом случае исчезло бы какое-то количество барионов и лептонов, что противоречит закону сохранения барионного и лептонного чисел. Замкнутый мир мог бы образоваться, если бы в сильных гравитационных полях эти законы не выполнялись. Это означало бы, что по сравнению с другими типами взаимодействий электромагнитное взаимодействие обладает какой-то исключительностью. Законы сохранения барионных и лептонных зарядов в этом случае были бы законами, так сказать, низшего ранга по отношению к закону

* Говоря точнее, в метрику Райснера — Нордстрема, соответствующую точечной электрически заряженной гравитирующей массе. На очень больших расстояниях эта метрика не отличается от метрики Шварцшильда (различие пропорционально $1/r$, $r \rightarrow \infty$).

сохранения электрического заряда. Пока нет никаких указаний на это*.

Итак, полная масса полузамкнутого мира может сильно варьироваться и достигать, вообще говоря, очень малых значений, близких массам элементарных частиц или, возможно, даже равных им. По отношению к внешнему миру такие системы будут вести себя как микрочастицы. М. А. Марков предложил называть подобные частицы фридмонами. (К. П. Станюкович предпочтает называть их планкеонами по имени М. Планка).

Оценки показывают, что электрический заряд фридмонов также должен быть близок к зарядам элементарных частиц, поскольку его первоначальный заряд Q быстро уменьшается в результате интенсивного рождения пар частиц в сильном электрическом поле горловины, связывающей внешний и внутренний миры. Компоненты этих пар, имеющие заряд, противоположный заряду системы, будут захватываться последней и уменьшать ее заряд Q , а частицы с электрическим зарядом, одноименным заряду системы, будут выталкиваться на бесконечность. Оценки показывают, что независимо от своего начального значения заряд системы при этом снижается до $Q \leq 137 e$. Поляризация вакуума еще более уменьшает это значение [50, 59].

Если в силу каких-то условий физическая система с плотностью вещества, равной или большей критической, первоначально была сильно несимметрична по отношению к веществу и антивеществу, то квантовые эффекты рождения пар в горловине приведут эту систему в практически зарядово-симметричное состояние**.

Во внешнем мире фридмон ведет себя как черная дыра с размерами

$$R = R_{\text{q.d.}} = \frac{2Q V_{\mathbf{x}}}{c^2} \lesssim \frac{300e V_{\mathbf{x}}}{c^2} \sim 10^{-30} \text{ см.} \quad (60)$$

Однако это выражение дает представление лишь о «сердцевине» объекта, вокруг которой из-за различных квантовых процессов должна возникнуть своеобразная «атмосфера» радиуса $R \sim 10^{-13} \text{ см}$, состоящая из различных виртуальных частиц.

Мы видим, что свойства фридмонов, предсказываемых общей теорией относительности, могут быть весьма близкими к характеристикам элементарных частиц и в то же время содержать внутри себя целый мир с невообразимо большим числом космических объ-

* Образованию замкнутого мира препятствует также вращение системы.

** В частности, если плотность вещества в нашей Метагалактике окажется близкой к критической, то Метагалактика должна содержать антивещество, и это антивещество на основании изложенных выше соображений может быть локализовано в основных в областях, близких к фридмановскому горизонту нашего мира. И наоборот, если в отдаленных областях Метагалактики будет обнаружено антивещество, это обстоятельство может служить одним из аргументов в пользу замкнутости нашей Метагалактики [49].

ектов. Это поразительным образом возвращает нас к упоминавшейся в начале параграфа идее о Вселенной как о системе вложенных друг в друга миров. Каждый из таких миров может содержать колоссальное число фридмонаов и в свою очередь являться фридмоном в другом мире и т. д. Другими словами, двигаясь по этой последовательности миров все «выше и выше», т. е. описывая поверхности, включающие все большее и большее число звеньев этой последовательности, можно получать повторяющиеся ситуации, когда полная масса ограниченной таким образом системы будет вновь оказываться близкой к нулю. Гравитационный дефект масс делает в принципе возможным существование такой вакуольной модели Вселенной [48]. Возможность подобной картины не зависит от того, тождественны фридмонаы уже известным элементарным частицам или же представляют собой особые микрообразования, которые еще только предстоит открыть в экспериментах.

Модель фридмонаов позволяет получить общий теоретический подход к проблемам элементарных частиц и грандиозных космических объектов, вплоть до проблемы строения всей Вселенной — в этом заключается исключительная привлекательность такой гипотезы. Здесь мы впервые встречаемся с уникальной ситуацией, когда для объяснения свойств микрообъектов приходится привлекать космические макроявления и, наоборот, решение фундаментальных космологических проблем происхождения и строения нашего Мира связывать со свойствами вещества в ультрамалых областях пространства — времени. Разделение Мира на макро- и макроявления не абсолютно и имеет смысл лишь в определенных рамках. Бесконечность материального мира, которую часто представляют в виде прямой, уходящей в область исчезающие малых, с одной стороны, и в область неограниченно больших интервалов, с другой, в рассматриваемой модели подобна спиральным виткам, когда ультрамалое каждый раз оказывается и ультрабольшим.

Замыкающаяся в свой микромир Вселенная, являясь причиной самой себя, осуществляет нескончаемый круговорот взаимопревращений материи.

Вместе с тем следует, конечно, отдавать себе отчет в том, что приведенные выше выводы о «макроскопической природе» микрообъектов получены на основе современной теории гравитации, которая представляет собой чисто классическую, неквантовую теорию, не учитывающую очень многое из того, что нам уже известно о свойствах явлений в малых пространственно-временных областях.

Если не считать весьма частного случая очень слабых полей, когда можно воспользоваться линейным приближением, то мы пока не располагаем теорией, которая позволяла бы одновременно учитывать гравитационные и квантовые явления. Тем не менее даже на современном уровне ясно, что учет квантовых закономерностей существенно изменит многие из приведенных выше выводов. Корректиды приходится вносить уже на расстояниях порядка 10^{-13} см.

Оказывается, что черные дыры с радиусом $R_{\text{ч.д.}} \leq 10^{-13} \text{ см}$ неустойчивы и вопреки своему названию довольно быстро теряют массу путем излучения. Это связано с тем, что на микроскопических расстояниях становится возможным виртуальное рождение и аннигиляция пар частиц и античастиц. Один из компонентов пары, например электрон, может поглотиться черной дырой, тогда второй компонент, позитрон, уже не имеет партнера для аннигиляции и должен излучиться. Образно говоря, вокруг черной дыры происходит как бы «вспышка» вакуума, а внешне это выглядит как постепенное испарение и стягивание черной дыры ($M \rightarrow 0$, $R_{\text{ч.д.}} \rightarrow 0$). Оценки показывают, что черная дыра с радиусом порядка 10^{-13} см должна вести себя как тело, нагретое до температуры приблизительно 10^8° .

По мере того, как $R_{\text{ч.д.}}$ уменьшается, квантовые эффекты вокруг черной дыры, а следовательно, и ее излучение становятся все более заметными. Для черных дыр размером порядка 10^{-13} см такой процесс нарастающей интенсивности излучения может продолжаться один-два десятка миллиардов лет, приобретая в конце характер взрыва.

По-настоящему черными, ничего не излучающими, оказываются лишь большие черные дыры. Их температура составляет миллионные доли градуса и время, которое потребовалось бы для их испарения, равно $10^{60}—10^{70}$ лет.

В настоящее время не ясно, чем заканчивается взрыв микроскопической черной дыры. Это может быть полное испарение ее наблюдаемой массы и «схлопывание» пространства — времени. Но может случиться и так, что на уровне очень малых масштабов $\Delta x \ll 10^{-13} \text{ см}$, $\Delta t \ll 10^{-23} \text{ сек}$ произойдет стабилизация и образуется фридмон — устойчивый объект, обладающий не только микроскопическими размерами, но и микроскопической массой. Здесь мы вступаем в область чистой фантазии. Трудно быть уверенным в том, что известные сейчас физические законы, в том числе и квантовая теория, останутся справедливыми в области $\Delta x \ll 10^{-17} \text{ см}$, а тем более в таких малых интервалах, как радиусы фридмонов $R \leq 10^{-30} \text{ см}^*$.

Тем не менее поражает естественность, так сказать, автоматизм образования в рамках общей теории относительности «космических систем» с внешне микроскопическими параметрами. Едва ли это случайно и в какой-то степени не отражает определенные стороны реального положения вещей.

* Интересно отметить, что учет гравитационных явлений, описываемых нелинейными уравнениями, может сыграть регуляризующую роль по отношению к другим полям и сделать конечными расходящиеся сейчас выражения. В ряде моделей это, действительно, удается. Если в формализме современной теории элементарных частиц естественным оказывается образ точечной частицы, то в общей теории относительности вследствие стремления объекта к самозамыканию (образованию фридмона) при увеличении энергии естественно возникает образ протяженной частицы (эти вопросы подробно обсуждаются в работе М. А. Маркова [50]).

§ 25. Геометродинамика

Через 15 лет после открытия Эйнштейном общей теории относительности он в одном из своих выступлений заметил: «Мы приходим к странному выводу: сейчас нам начинает казаться, что первичную роль играет пространство; материя же должна быть получена из пространства, так сказать, на следующем этапе. Пространство поглощает материю» [60, с. 243]. В этом высказывании кратко сформулирована программа полной геометризации физического знания, выполнению которой Эйнштейн посвятил большую часть жизни.

Сама по себе идея свести все многообразие материального мира в геометрии к определенным свойствам пространства не нова. В частности, еще в 1870 г., задолго до создания теории относительности, английский математик Клиффорд выпустил работу, в которой старался обосновать мысль о том, что вещества и его движение во всех их многогранных проявлениях представляют собой всего лишь свойство пространства — проявление его изменяющейся во времени кривизны. Однако до тех пор, пока не были открыты законы общей теории относительности, подобные концепции имели характер натуралистических догадок.

Эйнштейн первым понял значение основной особенности гравитационных свойств вещества, состоящих в том, что в отличие от всех других известных нам полей гравитационное поле сообщает одинаковое ускорение всем телам, независимо от их «гравитационного заряда» — массы. Ни одно другое поле не обладает таким замечательным свойством (например, под действием одного и того же электрического поля тела получают различные ускорения в зависимости от значения e/m — отношения их заряда к массе). Именно эта особенность гравитационного поля, его универсальность позволяет описать гравитацию через свойства пространства — времени: гравитационный потенциал $\varphi_{\alpha\beta}$ совпадает с метрическим тензором $g_{\alpha\beta}$, и гравитационные силы, определяемые градиентом

$$\partial\varphi_{\alpha\beta}/\partial x_\mu \equiv \partial g_{\alpha\beta}/\partial x_\mu, \quad (61)$$

можно рассматривать как проявление кривизны четырехмерного пространства — времени, которая выражается через те же производные $\partial g_{\alpha\beta}/\partial x_\mu$.

Траектории тел в этом случае совпадают с геодезическими (экстремалями) искривленного *пустого* пространства — времени, а теория приобретает замечательную простоту и стройность.

Точка зрения, согласно которой гравитация представляет собой кривизну пространства — времени, стала казаться особенно убедительной после того, как Эйнштейну и его сотрудникам Громмеру, Инфельду и Гоффману удалось показать, что уравнение движения частицы можно вывести из геометризованных уравнений гравитации.

онного поля и это уравнение не нужно вводить в теорию в качестве дополнительного постулата. Единственным непоследовательным моментом оставалась лишь необходимость предполагать существование самих движущихся объектов — гравитирующих масс. Стремление устраниТЬ эту непоследовательность и вместе с тем включить в систему геометризованных законов другие типы полей и прежде всего электромагнитное излучение явилось отправным пунктом последующих работ самого Эйнштейна и многих других выдающихся физиков по созданию «единой теории поля» или, как принято сейчас говорить, геометродинамики.

Уилер, один из ведущих специалистов в этой области, следующим образом характеризует интуитивную физическую картину, лежащую в основе этого направления: «Представьте себе темные пятна, передвигающиеся по поверхности озера в поле зрения наблюдателя, смотрящего с высокой башни. Он изучает их движение достаточно тщательно, чтобы вывести уравнения движения и закон эффективных сил, действующих между этими «пятнами». Кроме того, из других исследований **ему известны законы гидродинамики жидкости в озере**. В один прекрасный день, воспользовавшись новым биноклем большей разрешающей силы, он видит, что «пятна» вообще не являются чуждыми объектами. Они являются вихрями в среде, свойства которой он уже знает. Тогда он возвращается к уравнениям гидродинамики и выводит из них законы движения завихрений и их взаимодействия. Это дает гораздо более глубокое понимание увиденного» [10, с. 62].

Насколько соответствует реальности такая картина? Действительно ли поля и частицы являются объектами, некоторым образом сконструированными из пространства, или же они представляют собой инородные объекты, погруженные в четырехмерное пространство — время? Является ли метрический континуум некой магической средой, которая, будучи определенным образом искривлена, представляет собой гравитационное поле, будучи покрыта «рябью», представляет собой электромагнитное поле и, будучи локально скручена, представляет собой долгоживущие концентрации массы — энергии с соответствующим значением спина? Другими словами, можно ли назвать физику в основе своей чистой геометрией? Является ли геометрия только «ареной» для появления частиц и их взаимодействий или же она есть всё? Вот тот круг фундаментальных (философских и физических) вопросов, решением которых занята геометродинамика [10, с. 40].

Многочисленные попытки, в том числе и самого Эйнштейна, расширить физические возможности общей теории относительности за счет различных обобщений метрических элементов аппарата этой теории не привели к успеху (см., например, монографии [61, 62]), и в настоящее время все надежды сторонников геометродинамики связаны с глубоким изменением самой топологии пространства — времени, а в последнее время и с учетом квантовых эффектов.

Весьма характерна в этом отношении эволюция направления, развивающегося группой теоретиков во главе с Уилером [10, 11]. Первоначально этот подход был основан на том факте, что электромагнитное поле, обладающее энергией, а следовательно, и гравитирующей массой, определенным образом изменяет кривизну пространства — времени. Эти изменения — «отпечатки поля» — имеют настолько характерную форму, что можно надеяться полностью восстановить по ним все компоненты тензора электромагнитного поля. Рассмотрение системы гравитационного и электромагнитного полей при этом заменяется рассмотрением соответствующей изменяющейся со временем кривизны четырехмерного пространства — времени. По мнению Мизнера, Уилера и других сторонников геометродинамики этот результат доказывает, что как гравитационное, так и электромагнитное поле представляют собой всего лишь проявления геометрии, которая «переносит энергию через пустое пространство» [11, с. 20].

В частности, при определенных условиях пространство может быть сильно искривлено в некоторой ограниченной области, и это искривление, оставаясь достаточно устойчивым во времени, ведет себя как единый объект, который обладает массой и может изменять свое положение в пространстве. Такой «состоящий из пустого пространства» объект — «геон» — можно рассматривать как геометродинамическую модель материальной частицы. На более привычном нам языке гравитационных и электромагнитных полей можно сказать, что геон построен из электромагнитного излучения, которое удерживается в сравнительно небольшой ограниченной области пространства своим собственным гравитационным притяжением. Другими словами, существование геона возможно благодаря равновесию между давлением электромагнитной радиации и силами гравитационного сжатия. Аналогично можно построить «гравитационный геон» — концентрированный сгусток удерживающего само себя гравитационного поля.

Для того чтобы получить геометродинамическую модель положительного и отрицательного электрических зарядов, предполагают, что пространство — время обладает свойством многосвязности: в воображаемом пространстве большей размерности наше четырехмерное пространственно-временное многообразие представляет собой объект, к которому, образно говоря, как к бочонку, приделаны ручки (рис. 31). В одну горловину каждой из этих ручек сходятся, а из другой горловины расходятся, пройдя сквозь ручку, электрические силовые линии, т. е. соответствующие искривления пространства.

Таким образом, казалось бы, удается построить самосогласованную полностью геометризованную теорию, которая содержит всю классическую физику (механику, электродинамику, теорию гравитации) и в которой материя и ее движение целиком «рас растворены» в пространстве — времени и представляют собой всего лишь специфические проявления некоторых свойств последнего.

Дж. Уилер формулирует этот вывод как возможность построения классической картины Мира, в которой имеется «масса без массы», «заряд без заряда», «уравнения движения без уравнений движения» и «взаимодействие без констант взаимодействия» — все это содержится в геометродинамических уравнениях, устанавливающих структуру пространства — времени, согласующуюся со всеми известными законами классической физики [10]. Однако более детальный анализ показывает, что на самом деле последовательной и самосогласованной теории на этом пути построить все же нельзя.

Прежде всего в рамках классической геометродинамики не удается найти достаточно удовлетворительного представления понятию «электромагнитной фазы» — величины, характеризующей соотношение между «электрической» и «магнитной» частями поля в точке. Недопределенность этой фазы приводит к тому, что однозначное восстановление единого электромагнитного поля по его «гравитационным следам» во многих случаях невозможно.

Не оправдавшими себя оказались также надежды построить геометродинамическую модель частиц: геоны и «заряды-руочки» по своим свойствам существенно отличаются от всех известных сейчас физических объектов*.

Геометродинамика совершенно не объясняет многообразие полей и взаимодействий, существующих в природе. Можно было бы, конечно, попытаться дополнить эту теорию электрон-позитронным, пионным, нуклонным и другими известными нам сейчас полями (или «более элементарными» полями кварков, глюонов и т. п.). Однако мы снова пришли бы тогда к обычным затруднениям теории поля и были бы вынуждены ввести в теорию константы связи и характерные массы в качестве простейших необъясненных составных частей. При этом исчезли бы основные черты геометродинамики,

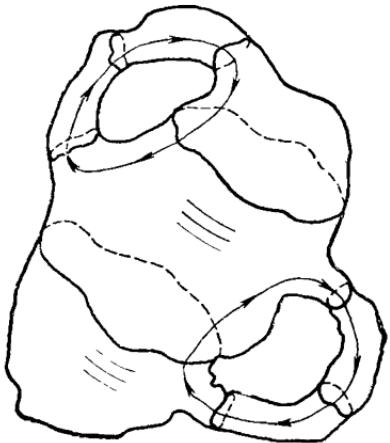


Рис. 31. Многосвязное пространство.

Горловины ручек интерпретируются как положительный и отрицательный электрические заряды. Силовые линии замкнуты и проходят через ручки

* Как отметил в своих обзорных лекциях [10, с. 69] Уилер, геонами имеет смысл интересоваться не потому, что они могут объяснить что-либо реально наблюдаемое, а потому, что с их помощью можно получить некоторое представление об исключительном богатстве в искривленном пустом пространстве физических явлений, предсказываемых общей теорией относительности.

согласно которой, во-первых, пространство — время не просто арена для физических процессов, а — основное содержание мира, во-вторых, не существует нуждающихся в объяснении «мировых констант» и постоянных связи, как нет и независимо существующих полей, взаимодействующих друг с другом.

Особенно трудна геометризованная трактовка полей для нейтрино, электронов и других частиц с полуцелым спином. Описы-вающие их спинорные величины нельзя построить из тензорных функций гравитационного и электромагнитного полей.

Это только часть больших чисто физических трудностей, с которыми сталкиваются при попытке геометризации классической физики (не говоря уже о полной бесперспективности подобного подхода с методологической точки зрения, см. ниже). Надежды устраниТЬ или, по крайней мере, в какой-то степени уменьшить эти трудности сейчас связывают с учетом квантовых эффектов. В «квантовой геометродинамике» волновые законы применяют к описанию динамики изменения самой геометрии трехмерного пространства V_3 . Если в обычной механике частицы динамической переменной является координата в трехмерном пространстве, а событием — отдельная точка пространства — времени, то в квантовой геометродинамике такой динамической переменной служит «трехгеометрия» V_3 , а событием — определенное «значение» этой геометрии в некоторый момент времени t . Совокупность всех таких точек (трехгеометрий) составляет суперпространство — пространство трехмерных пространств, арену действия квантовой геометродинамики [11]*. Множество трехгеометрий $V_3(t)$, соответствую-щих последовательным моментам, $V_3(t_1)$, $V_3(t_2)$ и т. д. образует «классическую траекторию» движения (изменения) трехгеометрии в суперпространстве.

Вероятностный закон распределения значений трехгеометрий определяется волновой функцией $\Psi[V_3(t)]$, которая подчиняется соответствующему обобщенному уравнению Шредингера, а в классическом приближении — обобщенному уравнению Якоби — Гамильтона. Однако в настоящее время эти уравнения можно записать лишь чисто символически; их конкретная форма, математическая детализация входящих в них выражений, пока неизвестна [63, 64].

Что касается физического смысла суперпространства, то следует иметь в виду, что *реальным* физическим пространством — временем является четырехмерное многообразие $\{V_3(t), t\}$ — имен-но оно представляет собой Мир, в котором мы живем (во всяком случае, известную нам сейчас часть этого Мира, где пространство имеет три, а время — всего лишь одно измерение; см [65]). Одна-ко этот Мир, его метрические и топологические свойства могут изменяться с течением времени; может, например, изменяться кривизна пространства, где-то в области ультрамалых (или уль-

* При этом геометрии, представляющие собой различные точки суперпространства, могут в отдельных частях совпадать между собой, т. е. однократно или многократно пересекаться.

трабольших, см. § 24) масштабов это пространство из односвязанного может перейти в многосвязанное и т. д. Совокупность всех возможных конфигураций $\{V_3(t), t\}$, которые может иметь наш Мир (так сказать, совокупность «фотографий» всех его мгновенных положений, допустимых физическими законами) и образует суперпространство.

Таким образом, суперпространство подобно, например, гильбертову пространству квантовой механики или пространству энергии — импульса: это абстрактная математическая структура, отражающая определенные закономерности окружающего нас мира.

Как следствие квантового соотношения неопределенностей в области очень малых расстояний Δx возможны чрезвычайно большие флюктуации массы

$$\Delta m \sim \Delta p / c \approx \hbar / c \Delta x, \quad (62)$$

а следовательно, и кривизны пространства — времени. На расстояниях порядка планковской длины:

$$\Delta x \leq \sqrt{\hbar \kappa / c^3} \approx 1.6 \cdot 10^{-33} \text{ см} \quad (63)$$

эти флюктуации становятся настолько значительными, что можно предполагать существенные изменения не только метрики, но и топологических свойств пространства. Структура пространства в этих случаях приобретает очень сложный вид; по Уилеру, пространство квантовой геометродинамики можно сравнить со слоем слегка волнующейся пены. Слабо изменяющаяся поверхность этого пенного ковра соответствует классической геометродинамике. Беспрерывные микроскопические изменения внутри пенного ковра, где все время исчезают ячейки пены и возникают новые, символизируют квантовые флюктуации геометрии. Эти микроскопические флюктуации непрерывно меняют связность пространства [11, с. 54],

Более того, если известные сейчас квантовые соотношения неопределенностей, действительно, можно экстраполировать в области таких малых расстояний Δx и длительностей $\Delta t = \Delta x / c$, то следует ожидать, что интервалы $\Delta x \approx 10^{-33} \text{ см}$ и $\Delta t \approx 10^{-43} \text{ сек}$ представляют собой минимальные «порции», которыми пространство и время участвуют в физических процессах. Это можно видеть из следующих простых соображений [43], основанных на соотношении $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$ где Δt — неточность момента времени, фиксируемого часами (т. е., в общем случае, каким-либо физическим процессом, локализованным с точностью Δx), а ΔE — неопределенность в значении энергии этих часов. Поскольку с неопределенностью $\Delta E = c^2 \Delta M$ связана соответствующая неопределенность гравитационного радиуса $R_{\text{гр}} = 2M\kappa / c^2$, то соотношение между Δt и ΔE можно переписать в виде

$$\Delta t \Delta R_{\text{гр}} \sim 2\hbar \kappa / c^4. \quad (64)$$

Учитывая теперь, что неопределенность положения часов Δx не

может быть меньше, чем неопределенность их размеров $\Delta R_{\text{гр}}$, а неточность показаний часов $\Delta t \gtrsim \Delta x/c$ (мы все время предполагаем, что скорости не могут превосходить скорости света c), получим оценку

$$(\Delta x)^2 \gtrsim 2\hbar x/c^3, \quad (65)$$

т. е. значения $\Delta x \sim \sqrt{2\hbar x/c^3} \approx 10^{-33} \text{ см}$ и $\Delta t = \Delta x/c \approx 10^{-43} \text{ сек}$ представляют собой наименьшие интервалы, которые могут выступать в качестве характеристики пространственно-временного положения физических явлений. Этот вывод, независимо от геометродинамики, чрезвычайно интересен с принципиальной точки зрения.

Другим важным обстоятельством является то, что плотность энергии, связанной с вакуумными флюктуациями геометрии:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta E}{\Delta x^3} \sim \frac{c^2 \Delta M}{\Delta x^3} \sim \frac{c^5}{\hbar x^2} \approx 10^{95} \text{ г/см}^3, \quad (66)$$

оказывается несравненно больше, чем средняя плотность ядерного вещества $\mathcal{E} \sim 10^{14} \text{ г/см}^3$. Это позволяет квантовой геометродинамике трактовать частицы как относительно слабые возбуждения пространства, реализующиеся в значительно больших областях Δx , чем типичные флюктуации геометрии. С точки зрения геометродинамики элементарные частицы представляют собой «квантовые состояния возбужденной геометрии» нечто подобное экситонам, образующимся в твердых телах. По сравнению с огромной плотностью энергии внутри «пузырьков геометродинамической пены» сильные, слабые и умеренные взаимодействия по своему характеру различаются между собой не больше, чем отличаются друг от друга ионные, вандерваальсовы и валентные силы; они представляют собой относительно малый результирующий эффект изменения энергии, связанной с вакуумным «возбуждением пространства», эффект так же несущественный для физики самого вакуума, как облако несущественно для динамики всей земной атмосферы [11, с. 63].

Следует, однако, иметь в виду, что в рамках современной геометродинамики все эти утверждения имеют пока лишь характер гипотез и предположений (хотя и очень красивых). Никакие количественные расчеты, подтверждающие возможность возникновения частиц из «чистой геометрии», а тем более возможность сведения всего многообразия известных нам типов элементарных частиц к возбуждениям «пустого пространства», еще не выполнены. В сущности, все, что дало применение идей квантовой теории в геометродинамике — это формулировка символического уравнения Шредингера для изменяющейся геометрии Мира (или обобщенного уравнения Якоби — Гамильтона для функции действия S при использовании континуальных интегралов Фейнмана) и оцен-

ка квантовых флюктуаций метрики на основе соотношения неопределенностей. В квантовой геометродинамике сохраняются все трудности определения электромагнитной фазы,ственные ее частному случаю — классической геометродинамике.

В целом можно сказать, что попытка построения физической картины Мира на основе лишь свойств пространства и времени по-прежнему остается на стадии программы, несмотря на многолетние усилия самого Эйнштейна и многих других выдающихся теоретиков. Более того, трудности на пути выполнения этой программы с течением времени не уменьшаются, а наоборот, возрастают.

Программа построения чисто геометрической картины Мира, когда вещество, материя, целиком сводятся к пространству, а физика — к геометрии, совершенно несостоятельна и в методологическом отношении. Вполне естественно, что в свойствах пространства и времени, представляющих собой форму существования материи, находят отражение определенные черты материального содержания пространства и происходящих в нем процессов. Соответствующие изменения пространственно-временной формы настолько специфичны, что по форме можно в известной степени судить и о самом содержании. Тем не менее отсюда вовсе не следует, что форма стала определяющей, первичной по отношению к своему содержанию; тем более нельзя утверждать, что содержание возникает из формы.

Как отмечал сам Эйнштейн, при геометродинамическом подходе «пространство <...> выступает как реальность, которая в определенном смысле является высшей по отношению к материальному миру» [66, с. XIV].

Реальная физическая ситуация, действительное положение вещей в геометродинамике фактически вывернуты наизнанку, поставлены на голову. Пространственной форме здесь по существу присваивают свойства определяющей ее материальной первоосновы, которая, наоборот, рассматривается как некий атрибут своей формы. При этом время в конечном счете также становится атрибутом пространства, формой его существования, выражющей свойство изменения, самопреобразования пространства. Неудивительно, что при такой постановке вопроса не удается построить последовательной и достаточно подробной картины физических явлений. «Следов», оставляемых материальными процессами в свойствах пространства и времени, совершенно недостаточно для того, чтобы можно было во всех деталях восстановить неисчерпаемое богатство материального мира. Впечатляющая аналогия, которую Уилер пытался провести между геометризацией масс и гидродинамическим описанием вихрей на поверхности жидкости, совершенно незаконна: в отличие от гидродинамики, где вихри и остальная часть жидкости «состоят» из одного и того же вещества, природа пространства — времени и материальных объектов принципиально различна.

Приведенные критические соображения можно было бы считать достаточно убедительными, когда речь идет об оценке геометродинамики в целом как попытки полностью подменить материю ее атрибутами, попытки рассматривать вещества в качестве «воздушного состояния пространства». Уже сам по себе тот факт, что это направление не только не привело до сих пор к успеху, но неизменно сталкивается с глубокими противоречиями физического характера, в значительной степени его дискредитирует и подтверждает правильность приведенных выше методологических замечаний. Однако, когда речь идет конкретно о гравитации, требуется более подробное рассмотрение, поскольку разработанная для этого частного случая теория Эйнштейна имеет полностью геометризованный вид, и на этот факт нельзя закрывать глаза.

В настоящее время существует несколько принципиально различных точек зрения на физическую природу гравитации. Некоторые авторы считают, что в «общей теории относительности инерция и гравитация являются полями геометрических величин пространства — времени и поэтому, как и само пространство — время, — суть формы существования материи, а не материя» [67, с. 198]. Однако, будучи всего лишь формой существования материи, гравитационное поле не может тогда обладать массой, энергией и импульсом [там же, с. 197, 204]. Такую точку зрения трудно согласовать с тем фактом, что гравитация всегда связана с определенной энергией. Например, гравитационным взаимодействием с Луной объясняются морские приливы, в гравитационном поле может происходить рождение «обычного» вещества: электрон-позитронных пар и других частиц, а квантование слабого гравитационного поля приводит к выводу о существовании особых частиц — гравитонов, обладающих массой, энергией и импульсом; с помощью этих частиц и осуществляются гравитационные взаимодействия.

Значительное распространение имеет и противоположная точка зрения, согласно которой гравитация по своей природе представляет собой такое же материальное поле, как например, поле электромагнитного излучения, поле мезонов и другие известные нам поля, хотя и отличается существенно от них по своим свойствам. Гравитацию трактуют здесь как специфический вид материи (см., например, работы А. З. Петрова [68, с. 83; 69, с. 170]). Одним из основных соображений в пользу такой точки зрения является связь гравитации с энергией и импульсом. Однако этот подход трудно последовательно провести, если не считать, что гравитационное поле подобно всем другим полям погружено в плоское четырехмерное пространство — время. Как показали многочисленные исследования, релятивистскую теорию гравитационного поля действительно можно сформулировать, не используя представлений о кривизне пространства — времени. В случае изолированных тел и слабых полей такая теория по своим результатам полностью эквивалентна гравитационным уравнениям Эйнштейна,

но при переходе к сильным полям, например вблизи гравитационного радиуса, теория чрезвычайно усложняется, становится фактически нелинейной и получить с ее помощью какие-либо конкретные результаты практически невозможно*.

Некоторые авторы, отождествляя гравитацию с кривизной пространства — времени, с одной стороны, и принимая во внимание, с другой стороны, ее материальный аспект, приходят к заключению, что «нельзя провести границу между собственно материей и пространством — временем» [70, с. 40], и даже приходят к выводу о том, что пространство и время сами являются определенным видом материи (см., например, [71, с. 237, 238]). Такая точка зрения приводит к логическим или к серьезным методологическим трудностям. Как справедливо отметил А. М. Мостепаненко, «если пространство — время — вид материи, то спрашивается, находится ли этот вид материи в свою очередь в пространстве и во времени. Если он находится в пространстве и во времени, проблемы, связанные с их природой, опять остаются открытыми; если же он не находится в пространстве и во времени, то что же это за внепространственная и вневременная сущность?» [72, с. 20].

Некоторые авторы вообще отказываются от решения вопроса о сущности гравитации, считая, что в рамках современной теории «трудно сказать, что такое гравитация — вид материи или форма ее существования» [73, с. 14]. По их мнению «дело не только в недостаточности знаний о гравитации, но и в требовании современной науки иметь более точный и содержательный философский понятийный аппарат по сравнению с созданным на базе классической физики» [73, с. 14].

На наш взгляд, наиболее последовательным является представление о гравитации как об определенном *свойстве материи*. Материя (во всяком случае, известные нам сейчас ее виды) обладает таким свойством подобно тому, как она обладает, например, свойством инерции (массы). И подобно тому, как массе соответствует энергия — определенная характеристика атрибута материи, ее движения, так и гравитации соответствует кривизна (или более обще — геометрия) — вполне определенная характеристика другого атрибута материи: пространства и времени. Именно материальные объекты, обладающие массой, искривляют вокруг себя пространство — время, а не наоборот — искривления пространственно-временной метрики проявляются в виде материальных образований.

Определенной массе соответствует вполне определенное количество энергии и в этом смысле можно *условно* говорить об «эквивалентности» массы и энергии, но это вовсе не означает, что материя сводится к энергии — к движению. Точно так же из того

* Вместе с тем это является еще одним аргументом, доказывающим несостоятельность конвенционализма, сторонники которого считают, что всегда можно воспользоваться любой априорной геометрией цепью соответствующих изменений физических законов.

факта, что гравитации всегда сопутствует строго определенное искривление пространства — времени, нельзя сделать вывод о сведении материи к ее атрибутам — пространству и времени, хотя условно опять-таки можно сказать об «эквивалентности» гравитации и кривизны пространства — времени.

Очень часто встречающееся в литературе, особенно физической, представление о гравитации как о кривизне пространства — времени (иногда говорят, что поле тяготения есть отклонение свойств реального пространства — времени от свойств плоского многообразия) в буквальном смысле означает смешение двух понятий, одно из которых относится к самому материальному субстрату, а другое — к форме его существования. Этого можно избежать, если приведенные утверждения интерпретировать в смысле указанного выше *соответствия* (а не тождества) гравитации и кривизны и об эквивалентности последних говорить лишь в условном смысле.

Подобную точку зрения на сущность гравитации разделяют многие физики и философы. Например, в известной монографии Мак-Витти [74, с. 24] прямо говорится, что «вещество в целом обладает свойством, называемым тяготением, и если это свойство вещества присутствует в некоторой физической ситуации, должна существовать некоторая система материальных тел, ответственная за эти гравитационные эффекты». По мнению Мак-Витти, если вместо этого сказать, что тяготение есть независящее от материальных объектов «явление кривизны четырехмерного геометрического многообразия, это значит объяснить некоторую тайну с помощью загадки».

Представляя собой свойство, а не разновидность материи, гравитация в силу этого принципиально отличается от всех известных нам материальных полей. Последние могут переходить в другие виды материи, т. е. исчезать и заново возникать. Гравитация же и связанная с ней кривизна пространства — времени подобно массе, энергии, информации и другим характеристикам материи и ее атрибутов сохраняются в процессах, реализующихся в природе*.

* На первый взгляд может показаться, что это утверждение противоречит «переходу» гравитации в энергию приливов или рождению вещества (пар e^+e^- и т. п.) «за счет» гравитационной волны. Однако в этих и других подобных случаях силы гравитации и, соответственно, кривизна пространства — времени не уменьшается: при этом материя переходит из одной формы в другую, но этим формам соответствуют одни и те же масса и гравитация. С гравитацией (а следовательно, и с кривизной пространства — времени) так же, как и с массой, связано вполне определенное количество «эквивалентной» энергии.

В литературе иногда можно встретить высказывания об универсальном характере гравитации. «Все, что обладает энергией, гравитирует», — говорится, например, в статье [75]; «допущение существования негравитирующих форм материи означает допущение существования таких ее форм, которые лишены энергии, не переносят никакой информации, не участвуют ни в каких взаимодействиях, существование которых ни в чем не проявляется и ни на чем не сказывается» [там же, с. 271]. С этими высказываниями нельзя согласиться. У нас нет совершенно никаких оснований абсолютизировать такое вполне кон-

Утверждения сторонников геометродинамики о полном «растворении материи в пространстве» удивительно напоминают известные утверждения об «исчезновении материи», «окончательном сведении ее к движению» и т. д., которые были в ходу в начале этого века. В работе В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» убедительно показано, что все эти утверждения являются следствием смешения и путаницы совершенно разнородных понятий. Ленинский анализ ситуации и доказательство принципиальной невозможности свести материю к какому-либо из ее атрибутов применимы и к попыткам «построить движущуюся материю из пространства и времени».

Между энергетизмом начала XX в. и геометродинамическими подходами наших дней наблюдается поразительная аналогия. В частности, пользуясь тем, что массе соответствует определенное количество потенциальной и кинетической энергии, а гравитации — определенная кривизна пространства — времени, в том и в другом случаях можно найти простые, идеализированные физические ситуации, которые удается целиком описать на языке энергетических или, соответственно пространственно-временных представлений. Однако такое описание является чисто формальным и сразу же обнаруживает свою несостоятельность при переходе к более сложным, реальным физическим системам.

Мы видим, что все попытки объяснить окружающий нас Мир на основе только свойств пространства и времени безуспешны. Пространство и время не могут существовать без материи и вне ее. Неудача попыток полной геометризации физики служит еще одним подтверждением фундаментального положения диалектического материализма о том, что пространство и время «без материи суть ничто, пустые представления, абстракции, существующие только в нашей голове» [76, с. 550].

Поставим теперь обратный вопрос: может ли материя существовать вне времени и пространства? Другими словами, действительно ли пространство и время являются атрибутами материи, ее всеобщей, неотделимой от ее бытия формой, или же это только одна из многих возможных форм существования материи, соответствующая вполне определенным видам материальных образований?

крайнее свойство материи как гравитацию. Что же касается утверждений о том, что негравитирующие формы материи «не участвуют ни в каких взаимодействиях» и «ни в чем не проявляются», то это всего лишь декларативное заявление, требующее доказательств.

Следует также подчеркнуть, что гравитацию, как и массу, нельзя рассматривать в качестве меры материи, хотя в определенных рамках как гравитация, так и масса могут служить характеристиками количества материального субстрата — вещества или поля.

§ 26. О возможности «внепространственных» и «вневременных» форм существования материи

Рассмотрение этого вопроса возвращает нас к обсуждению одной из самых основных и фундаментальных проблем философии — в чем состоит суть пространства и времени. Ясно, что совершенно недостаточно, как это иногда делается в популярных статьях по философским проблемам естествознания, охарактеризовать пространство и время только как всеобщую форму существования материи, так как при этом полностью обходится вопрос о том, есть ли такая *всеобщая* форма; может быть, формы существования материи целиком зависят от конкретных условий и для них вообще нельзя указать какие-то общие характерные черты?

Гильберт, один из наиболее выдающихся математических умов нашего века, например, считал, что «мы отнюдь не обязаны верить, что пространственно-временная картина движения имеет физический смысл для сколь угодно малых областей пространства и времени; напротив, есть все основания сомневаться в том, что deline-
ние движения до бесконечности будет давать нам нечто такое, что по-прежнему можно будет называть движением» [77, с. 16]. Воз-
можность микроявлений вне времени и пространства допускают и многие другие ученые (см. обсуждение гипотезы макроскопическо-
го пространства — времени, § 6), тем более, что и по мнению не-
которых философов-материалистов категория материи в силу
своего гносеологического содержания, вообще говоря, не требует
приписывания ей каких-либо априорных и обязательных атрибу-
тивных признаков [78, с. 27].

Кроме того, содержание самих философских категорий, доста-
точное на каком-то определенном уровне развития науки, с тече-
нием времени углубляется и обогащается. «<...> Если все разви-
вается, то относится ли сие к самым общим понятиям и категори-
ям мышления? <...> Если да, значит, есть диалектика понятий
и диалектика познания, имеющая объективное значение», — подчер-
кивал В. И. Ленин [79, с. 229].

Может быть, с этой точки зрения пространство и время — в том
смысле, какой мы вкладывали в них до сих пор, — действительно
не являются универсальными? А если это так, то чем характерны
и какими *принципиально* новыми свойствами обладают внепро-
странственные и вневременные формы существования материи?

Следует заметить, что сама по себе «проблема внепространст-
венного и вневременного существования» далеко не нова и приоб-
рела актуальность не только в связи с открытием непривычных
для нее свойств микропроцессов. В частности, средневековые схола-
сты потратили немало усилий на выяснение смысла «довремен-
ной вечности», «вневременности акта творения», произошедшего
«в то время, когда еще не было времени», и тому подобных вопро-
сов, привлекающих большое внимание и современных неотомистов
[80]. Отдали дань этой проблеме и другие философские направ-
ления.

Для современной физики, занимающейся исследованием явлений микромира, обсуждение вопроса о том, сохранит ли пространственно-временной способ представления физической реальности свое значение также и в будущем или уже сейчас имеются определенные указания на ограниченные возможности такого способа описания, соответствующего лишь некоторым частным видам материи и ее движения, является особенно важным и актуальным. Конкретное решение этого вопроса представляет собой определенную экстраполяцию знаний о свойствах пространственно-временных отношений на область ультрамалых, недоступных еще нам масштабов. Такая экстраполяция представляет собой физико-методологическую гипотезу, определенным образом выражающую то, что сейчас принято называть «научно-общественным мнением», и существенно влияющую на направление дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в этой области.

Когда дело касается определения понятий пространства и времени, то на первый взгляд их смысл представляется весьма наглядным и ясным; однако если вместо определения путем аппеляции к «очевидным» примерам повседневного чувственного опыта попытаться построить формально-логическое определение этих понятий, т. е. попытаться выразить их в терминах каких-то еще более широких категорий, то мы сразу же встретимся с большими трудностями: понятия пространства и времени оказываются одними из наиболее абстрактных и общих понятий из всех нам сейчас известных, с трудом поддающихся теоретическому определению.

Трудности на этом пути настолько велики, что некоторые философы, даже такие выдающиеся мыслители, как Кант [81, с. 255], считали бесполезным рассуждать о сущности времени и пространства, поскольку все эти рассуждения, по их мнению, не идут по существу далее мало полезных чисто «номинальных» определений.

В настоящее время в философской литературе представлены все три возможные материалистические точки зрения на пространство и время. Прежде всего это точка зрения, согласно которой пространство и время представляют собой объективные формы существования материи, выступающие как определенное выражение соответственно устойчивости и изменчивости ее бытия. Другими словами, пространство и время — это неисчерпаемо богатая данная нам в ощущениях совокупность значений мер устойчивости и изменчивости движения материи, а поскольку весь окружающий нас мир — движущаяся материя, то определенные таким образом пространство и время по необходимости являются всеобщими, универсальными формами бытия материи, и говорить о каких-либо вневременных и внепространственных формах существования материи просто бессмысленно.

«Пространство — время есть множество всяких событий в мире, взятое в отвлечении от всех его свойств, кроме тех, которые определяются структурой системы отношений воздействия одних событий на другие» [82, с. 125].

Поскольку существование разнородной в своих состояниях материи является наиболее общей характеристикой ее бытия, а со-существование и изменение в свою очередь — наиболее общие характеристики разнородности, то общность определенных таким образом пространства и времени такова же, как и самой материи. «В мире нет ничего, кроме движущейся материи, и движущаяся материя не может двигаться иначе, как в пространстве и во времени» — подчеркивал В. И. Ленин [83, с. 181].

Именно в силу общности философского определения пространства и времени наряду с четырехмерно-протяженным конфигурационным пространством — временем $\{x, t\}$, которые мы обычно только и принимаем в качестве пространства и времени, могут существовать и другие типы пространств. Другими словами, можно ожидать, что неисчерпаемости свойств и видов материи сопутствует неисчерпаемость ее различных пространственно-временных форм. Наше обыденное представление о пространстве и времени, а также их определения, используемые в современной физике, неразрывно связаны с такими весьма конкретными свойствами структуры, как свойство *соседства*, позволяющее нам судить о существовании двух точек (явлений, объектов), и свойство *следования* их состояний. Априори нельзя утверждать, что эти свойства, а тем более такая конкретная их характеристика, как расстояние (Δx или Δt), будут присущи всем материальным уровням, всем бесконечно разнообразным типам движения.

Подобный подход к проблеме пространства и времени представляется наиболее общим и последовательным (его отстаивают также В. И. Свидерский [84, 85], А. М. Мостепаненко [65, 72] и др.)

Вместе с тем важно отдавать себе отчет в том, что хотя философские положения дают общий подход к проблеме, тем не менее из-за их чрезвычайной общности они не могут, конечно, помочь достаточно полно определить пространство и время. Философские положения обязательно должны быть дополнены конкретной информацией о свойствах пространства и времени, соответствующей данному этапу развития естественно-научных знаний*. Возможно,

* В этом отношении нельзя, в частности, согласиться с мнением В. И. Свидерского и А. С. Кармина о том, что если мы признаем за диалектическим материализмом методологическую функцию, то необходимо признать и возможность решения определенных конкретных научных вопросов на основе «чисто философских», общих соображений [84, с. 208]. Безусловно, являясь обобщением практики, общие категории и положения диалектического материализма несут в себе значительную информацию о свойствах материального мира, однако выводы, которые можно сделать в применении к конкретным научным вопросам на основе только лишь этих данных, часто оказываются весьма неоднозначными и, как показывает исторический опыт, при этом очень легко «вместе с половиной выбросить и семя». Достаточно корректный анализ должен основываться как на философском базисе, так и на конкретной специфике рассматриваемой проблемы. Разделять эти два аспекта исследования и пытаться провести «чисто философское» или, например, «чисто физическое» исследование проблемы, а тем более утверждать, что путем чисто философского анализа можно раскрыть какие-то «высшие» черты реальности, которые сами по себе недоступны естествознанию, представляется неправильным.

в будущем будут обнаружены такие необычные структурные формы движения, что им уже трудно будет сопоставить пространственно-временные понятия в их современном понимании. В этом смысле условно можно, конечно, говорить о «вневременных» и «внепространственных» формах существования материи. В частности, математика предоставляет много примеров структур со свойствами, совершенно непохожими на те, с которыми нам приходилось до сих пор иметь дело в физике. Соответствуют ли эти структуры каким-либо реальным формам материи — это уже вопрос эксперимента. Во всяком случае, как отмечал еще Гаусс, мы не должны смешивать того, что кажется нам неестественным, с абсолютно невозможным.

Другая, по-видимому, даже более распространенная точка зрения на смысл пространства и времени характерна тем, что, признавая всеобщность пространства и времени, считают, тем не менее, необходимым ввести в их определение те или иные конкретные свойства (обычно это — протяженность и длительность). Так, по мнению Р. Я. Штейнмана, отличительными характеристиками пространства является протяженность и порядок существования, а имманентной чертой времени — длительность и порядок смены явлений [86]; эти свойства считаются частью философского содержания понятий пространства и времени. Сходные высказывания можно найти в работах С. Т. Мелюхина [35, с. 152], Я. Ф. Аскина [87, с. 118] и др. При этом пространственную протяженность и временную длительность обычно понимают как выражение отношений следования элементов в их многообразии, выражение соотношений координации сменяющих друг друга состояний (явлений) [81, с. 227].

Признание протяженности, длительности, координации и других свойств известных нам сейчас материальных образований в качестве неотъемлемых характеристик пространства и времени, признаваемых, в свою очередь, атрибутами материи, означает, что этим свойствам придается статус универсальности.

Такой подход нельзя признать последовательным; он по необходимости содержит значительный элемент произвольного, так как, во-первых, неясно, какое именно из известных нам свойств пространства и времени следует считать более общим, чем другие*, во-вторых, в принципе нельзя доказать, что какое-либо определенное свойство пространственно-временной структуры, хотя оно и *кажется* нам сейчас наиболее важным и характерным, будет присуще и всем другим, еще не исследованным материальным уровням.

* Свойства протяженности (длительности), которые часто считаются основными характеристиками пространства и времени, выражающими специфичность этих форм бытия, в действительности, являются, в частности, свойствами любого множества, для которого можно ввести понятие длины (меры). Примеров таких множеств в физике очень много.

В физике уже сейчас можно привести примеры ситуаций, когда некоторые из таких абсолютизированных свойств оказываются нарушенными. Так, в качестве «изначального свойства» времени, выражающего его сущность как временного отношения, часто рассматривают хронологизацию событий, когда можно однозначно установить, какое из двух событий является прошлым по отношению к другому. Однако такая хронологизация теряет смысл в *T*-неинвариантных сверхслабых взаимодействиях, которые согласно используемому определению времени мы вынуждены были бы считать «вневременными». То же самое можно сказать и о таком казавшемся нам на основе макроскопической практики совершенно очевидным и «неотъемлемым» свойстве пространства, как существование правого и левого (а чем это хуже требования длины?).

К парадоксам неизбежно приводит любая попытка абсолютизации известных нам конкретных свойств пространства и времени. Можно, конечно, существенно расширить смысл, вкладываемый в понятия, которые соответствуют таким конкретным свойствам. Например, И. З. Цехмистро, говоря о фундаментальных неотъемлемых свойствах пространства, также утверждает, что «главнейшим из них является именно свойство протяжения, без которого пространство вообще немыслимо [90, с. 45]. По его мнению, «в общем случае пространство и есть не что иное, как определенная система протяжений» [там же, с. 44]. Однако протяжение И. З. Цехмистро определяет как «выражение возможности перехода от одного элемента данного многообразия к другому, что бы они собой ни представляли и какого бы рода операции для этого ни потребовались» [там же, с. 45]. Такое широкое понимание протяженности фактически совпадает с тем, что выше характеризовалось как свойство материи быть разнородной в своих состояниях. Едва ли стоит производить такую подмену понятий, этим можно лишь запутать суть дела.

Наконец, есть еще третья точка зрения на пространство и время. Некоторые философы, включая в определение пространства и времени их конкретные свойства (например, И. С. Алексеев считает, что к пространству обязательно надо применять понятия расстояния, протяженности, длительности, порядка существования и смены объектов [91—94]), согласны в то же время с тем, что эти свойства нельзя абсолютизировать. Соответственно, те формы существования материи, которые не обладают этими свойствами, предлагается не называть пространственно-временными и рассматривать их как некоторые более общие структурные формы бытия. «Пространство <...> есть особый тип структур сосуществования, <...>. Есть все основания считать его более общим (хотя бы с чисто логической точки зрения), нежели понятия пространства и времени», — отмечает И. С. Алексеев [93, с. 165]. Подобный подход также содержит определенный элемент произвола, поскольку, как уже отмечалось выше, априори мы не можем знать, какие

же свойства в действительности наиболее имманентны пространству и времени.

«Достаточно привести хотя бы один пример ситуации,— пишет И. С. Алексеев,— в которой пространственно-временные различия отсутствовали бы, несмотря на наличие других типов различий, чтобы положение об их универсальности было бы эмпирически опровергнуто. Нам представляется, что в отношении пространственных различий таким примером может служить определенным образом интерпретированная квантово-механическая тождественность (неразличимость) микрочастиц, а в отношении временных различий — квантовый скачок» [93, с. 163]. В гл. 1 было показано, что ни один из этих примеров в действительности не может служить доказательством существования внепространственных и временных форм материи. Наоборот, в настоящее время мы можем констатировать, что если не считать нарушения пространственной и временной четности в слабых взаимодействиях, все известные нам свойства пространства — времени (его размерность, пространственная изотропия, непрерывность, связность, причинная обусловленность событий и т. д.) удивительным образом сохраняются при изменении самих пространственно-временных интервалов на 45—50 порядков.

В связи с развитием физики элементарных частиц в аппарат современной теории кроме конфигурационного пространства — времени $\{x, t\}$ вошло большое число других пространств: четырехмерное пространство энергии — импульса, трехмерное пространство изотопического спина, пространства, связанные с группами симметрии SU_3 , SU_6 , и т. д. Эти *концептуальные* пространства используют для описания изменений различных характеристик материальных объектов и их движения. Однако привлечение их ни в коей мере не означает, что четырехмерное пространство — время $\{x, t\}$ лишается универсальности или выступает, как это утверждается, например, в работе [94, с. 91], в качестве только вторичного, производного понятия по отношению к более фундаментальным, первичным (по мнению авторов работы [94]) понятиям энергии и импульса. Подобный взгляд фактически равнозначен попытке сведения одного атрибута материи, ее пространственно-временной формы существования, к другому атрибуту — движению, когда движение материи фактически оказывается происходящим вне времени и пространства (не говоря уже о том, что представляется незаконным возводить в ранг универсальных вполне конкретные характеристики материальных процессов, каковыми являются энергия и импульс).

В ряде случаев пространство и время в физике определяют заданием способа измерения длины, длительности и других величин. Такой подход иногда рассматривают как единственно конструктивный и свободный от каких-либо методологических проблем. Однако возможность определенного способа измерений уже сама по себе предполагает вполне определенную структуру пространственно-вре-

менных отношений, реализацией которых и является задаваемая система измерительных операций.

Понятно, что получить последовательное и не зависящее от философских представлений («чисто физическое») определение пространства — времени таким путем нельзя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М., ГИТТЛ, 1957.
2. Йост Р. Общая теория квантованных полей. Пер. с англ. М., «Мир», 1967.
3. Вайтман А. Проблемы в релятивистской динамике квантованных полей. Пер. с англ. М., «Мир», 1967.
4. Боголюбов Н. Н., Логунов А. А., Тодоров И. Т. Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля. М., «Наука», 1969.
5. Соколов А. А., Иваненко Д. Д. Квантовая теория поля. М., ГИТТЛ, 1952.
6. Марков М. А. Гипероны и K -мезоны. М., ГИТТЛ, 1958.
7. Блохинцев Д. И. Пространство и время в микромире. М., «Наука», 1970.
8. Блохинцев Д. И. Нелокальные и нелинейные теории поля. — «Успехи физ. наук», 1957, т. 61, с. 137.
9. Киркнци Д. А. Нелокальная квантовая теория поля. — «Успехи физ. наук», 1966, т. 90, с. 129.
10. Уилер Дж. Гравитация, нейтрино и Вселенная. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
11. Уилер Дж. Предвидение Эйнштейна. Пер. с англ. М., «Мир», 1970.
12. Нелинейная квантовая теория поля. Сб. статей. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
13. Труды междунар. совещ. по нелокальной квантовой теории поля. Препринт ОИЯИ Р2-3590, Дубна, 1967.
14. Материалы II совещ. по нелокальным теориям поля в Азас. Препринт ОИЯИ 2-5400, Дубна, 1970.
15. Материалы III совещ. по нелокальным, нелинейным и неренормируемым теориям поля. Препринт ОИЯИ Д-2-7161, Дубна, 1963.
16. Вяльцев А. Н. Дискретное пространство — время. М., «Наука», 1965.
17. Барашенков В. С. Тахионы — частицы, движущиеся со скоростями больше скорости света. — «Успехи физ. наук», 1974, т. 114, с. 133.
18. Свешников Г. А. Причинность и детерминизм в квантовой теории. — В кн.: Философские проблемы физики элементарных частиц. М., Изд-во АН СССР, 1963.
19. Chrétien M., Peierls R. E. Properties of form factors in non-local theories. — «Nuovo cimento», 1953, v. 10, p. 668.
20. Bloch C. On field theories with non-localized interactions. — «Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Matematisk-fysiske Meddelelser», 1952, v. 27, N 8.
21. Марков М. А. К квантовой электродинамике. — «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1938, т. 8, с. 124.
22. Марков М. А. О нелокализуемых полях. — «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1951, т. 21, с. 11.
23. Wataghin G. Bemerkung über die Selbsternergie der Electronen. — «Z. Phys.», 1934, Bd. 88, S. 92.
24. Wataghin G. Über die relativistische Quantum-Electrodynamik und die Ausstrahlung bei Stässen sehr energiereicher Electronen. — «Z. · Phys.», 1934, Bd. 92, S. 547.
25. Блохинцев Д. И. Релятивистско-инвариантное обобщение законов взаимодействия элементарных частиц. — «Ученые записки МГУ. Сер. физ.», 1945, т. 77, с. 101.

26. Терлецкий Я. П. Парадоксы теории относительности. М., «Наука», 1966.
27. Stueckelberg E., Wanders G. Acausalité de l'interaction non-locale. — «Helvetica phys. acta», 1954, v. 27, p. 667.
28. Mead C. A. Observable consequences of fundamental-length hypotheses. — «Phys. Rev.», 1966, v. 143, p. 990.
29. Киржниц Д. А., Чечин В. А. Эффект Мессбауэра и теория квантованного пространства — времени. — «Ядерная физика», 1968, т. 7, с. 431.
30. Блохинцев Д. И. «Элементарная длина» и эффект Мессбауэра. — «Ядерная физика», 1973, т. 17, с. 830.
31. Берестецкий В. Б. Калибровочные симметрии и единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия. — В кн.: Материалы 1-й школы физики ИТЭФ. М., Атомиздат, 1973, с. 3.
32. Волков М. К. Двумерная релятивистская модель квантовой теории поля без ультрафиолетовых расходимостей. — «Ядерная физика», 1965, т. 2, с. 171.
33. Гейзенберг В. Введение в единую полевую теорию элементарных частиц. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
34. Ахундов М. Д. Проблемы прерывности и непрерывности пространства и времени. М., «Наука», 1974.
35. Мельюхин С. Т. К философской оценке современных представлений о свойствах пространства и времени в микромире. — В кн.: Философские проблемы физики элементарных частиц. М., Изд-во АН СССР, 1963.
36. Мельюхин С. Т. Философские проблемы современной физики. М., «Знание», 1966.
37. Ambarzumian V., Iwanenko D. Zur Frage nach Vermeidung der unendlichen Selbstrückwirkung des Electrons. — «Z. Phys.», 1930, Bd 64, S. 563.
38. Snyder H. Quantized space — time. — «Phys. Rev.», 1947, v. 71, p. 38.
39. Кадышевский В. Г. К теории дискретного пространства — времени. — Докл. АН СССР», 1961, т. 136, с. 70.
40. Coish H. Elementary particles in a finite world geometry. — «Phys. Rev.», 1959, v. 114, p. 383.
41. Shapiro I. Weak interactions in the theory of elementary particles with finite space. — «Nuclear Phys.», 1960, v. 21, p. 474.
42. Aristotle. On the Heavens, 15.271b. — In: Great boons of the western world V. 8. Chicago, 1952.
43. Френкель А., Бар-Хиллел И. Основания теории множеств. Пер. с англ. М., «Мир», 1966.
44. Маковельский А. Досократики. Ч. 1. Казань, 1914.
45. Маковельский А. Досократики. Ч. 3. Казань, 1914.
46. Лурье С. Я. Очерки по истории античной науки. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.
47. Лейбниц Г. Избранные философские произведения. Пер. с нем. Труды московского психологического общества. Вып. IV. М.—Л., 1908.
48. Markov M. A. Elementary particles of the largest masses (quarks, maximons). Сообщение ОИЯИ Е2-2973. Дубна, 1966.
49. Марков М. А. Замкнутость Вселенной и законы сохранения электрического барионного и лептонного зарядов. Сообщение ОИЯИ Д2-4534. Дубна, 1969.
50. Марков М. А. К теории фридмонов (о роли гравитации в теории элементарных частиц). Сообщение ОИЯИ Р2-5289. Дубна, 1970.
51. Markov M. A. On possible conceptual difficulties of quantum field theories involving gravitation. Сообщение ОИЯИ Е2-8838. Дубна, 1975.
52. Станюкович К. П. Гравитационное поле и элементарные частицы. М., Атомиздат, 1965.
53. Станюкович К. П. Пространственно-временные интерпретации моделей «Вселенной» А. Эйнштейна и А. Фридмана. — В кн.: Пространство и время в современной физике. Киев, «Наукова думка», 1968.
54. Friedman A. Über die Krümmung des Raumes. — «Z. Phys.», 1922, Bd 10, S. 377.

55. Friedman A. Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes. — «Z. Phys.», 1924, Bd 21, S. 326.
56. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Релятивистская астрофизика. М., «Наука», 1967.
57. Azhovit R., Deser S., Misner C. Minimum size of dense source distributions in General relativity. — «Ann. Phys.», 1965, v. 33, p. 88.
58. Асаинов Р. А., Марков М. А. О собственной энергии частиц в общей теории относительности. — «Письма ЖЭТФ», 1967, т. 5, с. 417.
59. Марков М. А., Фролов В. П. Метрика закрытого мира Фридмана, возмущенная электрическим зарядом (к теории электромагнитных «фридмонаов»). — «Теор. и матем. физ.», 1970, т. 3, с. 17.
60. Эйнштейн А. Речь в Ноттингеме. Собр. научных трудов. Т. 2. М., «Наука», 1965.
61. Бергман П. Г. Введение в теорию относительности. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1947.
62. Румер Ю. Б. Исследования по 5-оптике. М., ГИТТЛ, 1956.
63. Peres A. On Cauchy's problem in general relativity. — «Nuovo cimento», 1962, v. 26, p. 53.
64. Baierlein R. F., Sharp D. H., Wheeler J. A. Three-dimensional geometry as Carrier of information about time. — «Phys. Rev.», 1962, v. 126, p. 1864.
65. Мостепаненко А. М., Мостепаненко М. В. Четырехмерность пространства и времени. М.—Л., «Наука», 1966.
66. Einstein A. Forward in the book Jammer M. Concepts of space, the history of theories of space in physics. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1954.
67. Широков М. Ф. Является ли инерция и гравитация материей? — В кн.: Философские проблемы теории тяготения Эйнштейна и релятивистской космологии. Киев, «Наукова думка», 1965.
68. Петров А. З. Основные этапы развития теории поля в гравитации. — «Вопросы философии», 1964, № 11, с. 85.
69. Петров А. З. Гравитация и пространство — время. — В кн.: Пространство, время, движение. М., «Наука», 1971.
70. Компаниец А. С. Пространство и время в теории относительности. М., «Знание», 1961.
71. Дышлевой П. С. Материалистическая диалектика и физический релятивизм. Киев, «Наукова думка», 1972.
72. Мостепаненко А. М. Проблема универсальности основных свойств пространства и времени. Л., «Наука», 1969.
73. Дышлевой П. С. Философские вопросы современной теории гравитации. — В кн.: Философские проблемы теории тяготения Эйнштейна и релятивистской космологии. Киев, «Наукова думка», 1965.
74. Мак-Витти Г. Общая теория относительности и космология. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
75. Наан Г. И. Гравитация и бесконечность. — В кн.: Философские проблемы теории тяготения Эйнштейна и релятивистской космологии. Киев, «Наукова думка», 1965.
76. Энгельс Ф. Диалектика природы. — В кн.: Маркс К., Энгельс Ф. Сочинения. Т. 20. М., Госполитиздат, 1961.
77. Hilbert D., Bernays P. Grundlagen der Matematik. Bd 1, Verlag von J. Springer, Berlin, 1934.
78. Антипенко Л. Г. Проблема физической реальности. М., «Наука», 1973.
79. Ленин В. И. Философские тетради. Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 29.
80. Sertillanges A. D. L'idée de création et ses retentissements en philosophie. Paris, 1945.
81. Кант И. Исследование степени ясности принципов естественной теологии и морали. — В кн.: Сочинения. Т. 2.
82. Александров А. Д. Теория относительности как теория абсолютного пространства — времени. — В кн.: Философские проблемы современной физики М., Изд-во АН СССР, 1959.

83. **Ленин В. И.** Материализм и эмпириокритицизм. — Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 18.
84. **Свидерский В. И.** Некоторые вопросы диалектики изменения и развития. М., «Мысль», 1965.
85. **Свидерский В. И.** Некоторые вопросы философской теории пространства и вр мени. — В кн.: Философские вопросы современной физики. Киев, «Наукова думка», 1964.
86. **Свидерский В. И., Кармин А. С.** Конечное и бесконечное. М., «Наука», 1966.
87. **Штейнман Р. Я.** Пространство и время. Философская энциклопедия. Т. IV. М., «Наука», 1967.
88. **Аскин Я. Ф.** Проблема времени. М., «Мысль», 1966.
89. **Физический энциклопедический словарь.** Т. 4. М., «Советская энциклопедия», 1965.
90. **Цехмистро И. З.** Диалектика множественного и единого (квантовые свойства мира как неделимого целого). М., «Мысль», 1972.
91. **Алексеев И. С.** К вопросу о правомерности применения понятий пространства и времени в физике микромира. — В кн.: Пространство и время в современной физике. Киев, «Наукова думка», 1968.
92. **Алексеев И. С.** Пространство и квантовая механика. — В кн.: Философские вопросы квантовой физики. М., «Наука», 1970.
93. **Алексеев И. С.** Пространство, время, структура. — В кн.: Философия и физика. Воронеж, ВГУ, 1972.
94. **Румер Ю. Б., Овчинников Н. Ф.** Пространство — время, энергия — импульс в структуре физической теории. — «Вопросы философии», 1968, № 4, с. 82.
95. **Попов В. Н.** Континуальные интегралы в квантовой теории поля и статистической физике. М., Атомиздат, 1976.
96. **Квантовая теория калибровочных полей.** — Сб. статей. Пер. с англ. М., «Мир», 1977.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предыдущих главах были подробно рассмотрены изменения, которые претерпевают пространственно-временные отношения по мере перехода в область все более малых масштабов Δx и Δt . Наиболее значительными эти изменения оказываются на рубеже 10^{-6} — 10^{-8} см и соответственно 10^{-16} — 10^{-18} сек, когда лапласовски детерминированные «классические» законы движения сменяются вероятностными закономерностями квантовой механики. По сравнению с этим дальнейшее изменение пространственно-временных свойств вплоть до минимальных, достижимых с помощью современных ускорителей расстояний $\Delta x \sim 7 \cdot 10^{-16}$ см и длительностей $\Delta t \sim 2 \cdot 10^{-26}$ сек представляется уже не столь радикальным, существенные изменения свойств пространства и времени, связанные с несохранением пространственной и временной четностей, проявляются лишь в слабых взаимодействиях. Следует, однако, ожидать, что в области $\Delta x \leq 10^{-16} \div 10^{-17}$ см и $\Delta t \leq 10^{-27} \div 10^{-26}$ сек сечения (вероятность) слабых взаимодействий сравняются с сечениями электромагнитных и сильных взаимодействий и даже пре-взойдут их; это может сопровождаться значительным изменением известных нам сейчас пространственно-временных представлений.

Экстраполяция законов общей теории относительности и квантовой механики в область очень малых интервалов указывает, что при $\Delta x \leq 10^{-32}$ см, $\Delta t \leq 10^{-43}$ сек могут изменяться и флюктуировать не только метрические, но и топологические характеристики пространства — времени; здесь становится возможным образование замкнутых и полузамкнутых миров и другие «макроскопические» явления в микромире. Эти явления характерны для неизмеримо более глубоких областей, чем $\Delta x \sim 10^{-17} \div 10^{-18}$ см, которые, по-видимому, будут достигнуты на экспериментальных установках в ближайшие десятилетия, однако, возможно, именно они определяют структуру не только элементарных частиц, но и всего нашего Мира.

Мы рассмотрели различные попытки теоретического обобщения известных пространственно-временных представлений. Несмотря на поражающее воображение результаты, к которым приводят некоторые из этих попыток, в физическом отношении все они представляют собой дальнейшее развитие или экстраполяцию на ультрамалые масштабы идей, относящихся к области больших пространственно-временных интервалов. Каких-либо радикально новых идей, существенно отличающихся от известных подходов, пока не выдвинуто. Это, по-видимому, объясняется тем, что экспериментальные факты, по крайней мере, качественно, пока еще укладываются в рамки основных концепций.

Очень важно подчеркнуть, что у нас нет никаких оснований говорить об ограниченной применимости категорий пространства и времени. В достигнутых сейчас интервалах Δx и Δt речь может идти лишь о видоизменении пространственно-временных отношений без изменений понятий самого пространства и времени, хотя в экспериментах мы каждый раз имеем дело лишь с ограниченной областью масштабов, расширение которой может быть связано с существенным изменением известных нам пространственно-временных понятий. Этот вывод следует из всей совокупности доступной нам сейчас экспериментальной и теоретической информации.

Пространство и время представляют собой неустранимое, имманентное свойство материального мира, универсальную форму его существования. Все попытки оторвать материю от пространства — времени и представить Мир как «чистое» пространство — время без материи или, наоборот, как материю вне времени и пространства полностью несостоительными как в «чисто физическом», так и в «чисто философском» смысле. «Основные формы всякого бытия суть пространство и время, бытие вне времени суть такая же величайшая бессмыслица, как бытие вне пространства» — это основополагающее положение материалистической философии, сформулированное Энгельсом более ста лет назад [1, с. 51], полностью сохраняет свою силу.

По мере экспериментального углубления в область более малых пространственно-временных масштабов будут раскрываться все новые и новые свойства пространства и времени. Пространство и время в своих количественных и качественных характеристиках так же неисчерпаемы, как и материя. «Мысль человека бесконечно углубляется от явления к сущности, от сущности первого, так сказать, порядка к сущности второго порядка и т. д. без конца» [2, с. 227]. Наше неполное исторически ограниченное знание лишь в процессе бесконечного углубления в сущность материальных объектов лишь асимптотически может приблизиться к пределу абсолютного, полного знания, и этот процесс бесконечен во времени.

Никоим образом нельзя согласиться с утверждениями некоторых физиков, появившимися в последнее время, о том, что может наступить момент, когда будет достигнуто полное знание всех физических законов [3—5]. Подобные утверждения удивительно похожи на известное высказывание лорда Кельвина, который на рубеже нашего века также считал, что построение физики фактически заканчивается и светлые ее горизонты омрачены лишь двумя облачками: опытом Майкельсона и проблемой излучения черного тела. Однако, как известно, именно из этих небольших «облачков» развивалась квантовая теория, теория относительности и, в конечном счете, вся современная физика.

Положение, которое сложилось в физике в настоящее время, отличается от ситуации, имевшей место в конце XIX в., тем, что сейчас, наоборот, мы можем говорить об островках более или

менее законченных теорий и океане фактов, для которых мы в лучшем случае располагаем лишь некоторой систематикой.

Любая естественно-научная теория имеет область применимости, внутри которой при данном уровне развития техники измерений она может очень точно описывать эксперимент, и в этом смысле ее можно назвать «достаточно полной» и «завершенной»; однако возможность построения таких теорий вовсе не означает, что с их помощью можно полностью «перекрыть» весь «Мир», исчерпав все качественное богатство законов природы. В частности, поскольку всякая теория не априорна, а представляет собой следствие эксперимента, который по самой своей сути имеет ограниченный приближенный характер, конкретные естественно-научные теории не могут рассчитывать на описание процессов, протекающих в области сколь угодно малых и сколь угодно больших пространственно-временных интервалов. В любой теории рассмотрение этих областей имеет лишь смысл математической экстраполяции, и наоборот, их экспериментальное изучение является неисчерпаемым источником новых знаний.

Природа бесконечна как многообразием своих форм, так и сложностью своей структуры. Все утверждения о том, что наступит время, когда фундаментальные исследования придут к концу, поскольку мы будем знать все законы природы, имеют характер произвольных деклараций, в обоснование которых нельзя привести ни одного аргумента, основанного на данных современной науки или ее истории [6, 7]. Следует отчетливо понимать, что в основе всех выводов о «возможном конце физики» и в основе построений «окончательной», «полной» картины Вселенной всегда лежит абсолютизация тех или иных конкретных свойств бесконечно разнообразной материи.

Мир как целое вполне познаем, однако к любой научной картине мироздания следует относиться как к относительной истине, которая неминуемо будет уточняться и совершенствоваться в ходе дальнейшего исследования. «Ум человеческий открыл много диковинного в природе и откроет еще больше, увеличивая тем свою власть над ней» [2, с. 298].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энгельс Ф. Анти-Дюринг. Сочинения. Т. 20. М., Госполитиздат, 1961.— В кн.: Маркс К., Энгельс Ф.
2. Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм.— Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 18.
3. Фейнман Р. Характер физических законов. Пер. с англ. М., «Мир», 1968
4. Компанеец А. С. Может ли окончиться физическая наука? М., «Знание», 1968.
5. Компанеец А. С. К вопросу о том, может ли окончиться физическая наука.— «Философские науки», 1972, № 3, с. 114.
6. Барашенков В. С. Может ли быть конец физики как науки? — «Философские науки», 1971, № 6, с. 88.
7. Флеров Г. Н., Барашенков В. С. Наука в эпоху научно-технической революции. — «Вопросы философии», 1974, № 9, с. 58.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Список литературы	7
Введение	8
Список литературы	15
Г л а в а 1. Эмпирические основания пространственно-временных представлений	16
§ 1. Физические пределы пространственно-временного описания	17
§ 2. Область молекулярно-атомных явлений	24
§ 3. Область квантово-электродинамических процессов	32
§ 4. Субатомные пространственно-временные отношения	39
§ 5. Свойства пространства и времени в области ультрамалых масштабов $\Delta x \lesssim 10^{-16}$ см и $\Delta t \lesssim 10^{-26}$ сек	53
§ 6. О концепции «макроскопического пространства — времени»	55
Список литературы	62
Г л а в а 2. Причинные связи микроявлений	66
§ 7. Причинность и ее связь с пространством и временем	68
§ 8. Формулировка причинности в классической (неквантовой) физике	72
§ 9. Квантово-механическая трактовка причинности	78
§ 10. Причинность в квантовой теории поля	81
§ 11. Макро- и микропричинность	84
§ 12. Дилюсионные соотношения и их экспериментальная проверка	91
§ 13. Асимптотические соотношения	102
§ 14. Проблема временной необратимости	104
Список литературы	108
Г л а в а 3. Пространственно-временная симметрия и законы сохранения	111
§ 15. Свойства симметрии и законы сохранения	113
§ 16. «Всеобщие» и «частные» законы сохранения	118
§ 17. Является ли энергия величиной, характеризующей движение на любом уровне материи?	122
§ 18. Закон сохранения энергии и область его применимости	125
§ 19. Закон сохранения энергии для квантовых явлений. Виртуальные процессы	130
§ 20. В каком смысле следует понимать «несохранение» свойств и «нарушение» законов сохранения?	138
§ 21. Экспериментальная проверка законов сохранения	140
Список литературы	141
Г л а в а 4. Теоретические модели и обобщения	144
§ 22. Тахионы	147
§ 23. Нелокальные, нелинейные и перенормируемые теории. Квантование пространства — времени	150
§ 24. Макроскопические явления в микромире	165
§ 25. Геометродинамика	174
§ 26. О возможности «внепространственных» и «вневременных» форм существования материи	186
Список литературы	192
З а к л ю ч е н и е	196
Список литературы	198
	199

ИБ № 867

Владилен Сергеевич Барашенков

**ПРОБЛЕМЫ СУБАТОМНОГО
ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ**

Редакторы Е. В. Сатарова, А. И. Мельникова

Художественный редактор А. Т. Кирьянов

Переплет художника А. И. Шаварда

Технические редакторы А. Л. Гулина

Корректор Н. С. Карцева

Сдано в набор 05.09.78. Подписано к печати 20.01.79. Т-02922

Формат 60×90/16. Бумага тип. № 2. Гарнитура „Литературная“. Печать высокая. Усл. печ. л. 12,5 Уч.-изд. л. 14,4
Тираж 3450 экз. Зак. изд. 77033. Зак. тип. 825. Цена 2 р. 40 к.

Атомиздат, 103031, Москва, К-31, ул. Жданова, 5

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной
торговли. 113114, Москва, М-114, Шаболовская
наб., 10.