



ФИЛОСОФСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Р. Я. ШТЕЙНМАН

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1962

АННОТАЦИЯ

В книге дается анализ представлений о пространстве и времени в современной физике и космологии. В первой главе излагается история развития этих представлений в классической физике, начиная с Ньютона и Лейбница.

Книга предназначена для читателей, интересующихся философскими проблемами современного естествознания. Предполагается, что читатель знаком с основами физики в объеме общего курса, читаемого в высшей школе.

Рафаил Яковлевич Штейнман.

Пространство и время.

М., Физматгиз, 1962 г. 240 стр. с илл.

(Серия: «Философские проблемы естествознания»).

Редакторы: *И. В. Кузнецов* и *И. Г. Вирко*.

Техн. редактор *Л. В. Лихачева*.

Корректор *Т. С. Плетнева*.

Сдано в набор 3/II 1962 г. Подписано к печати 7/V 1962 г. Бумага 84×108/32. Физ. печ. л. 7,5. Условн. печ. л. 12,3. Уч.-изд. л. 13,38. Тираж 18000 экз. Т-04092. Цена книги 82 коп. Заказ № 113.

Государственное издательство физико-математической литературы.
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Московская типография № 5 Мосгорсовнархоза.
Москва, Трехпрудный пер., 9.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
Глава I. Основные концепции пространства и времени в классической физике и философии 17—19 веков . . .	10
§ 1. Концепция Ньютона	10
§ 2. Концепция Лейбница	20
§ 3. Понятия пространства и времени в философии 18—19 веков	32
§ 4. Представления о пространстве в неевклидовой геометрии	41
§ 5. Отход от ньютоновой концепции в физике 19 века. Воззрения Маха на пространство и время	53
§ 6. Взгляды Энгельса на пространство и время	61
Глава II. Пространство и время в специальной теории относительности	68
§ 7. Поле, пространство и время	68
§ 8. Специальная теория относительности Эйнштейна	86
§ 9. Анализ понятий пространства и времени в спе- циальной теории относительности	105
§ 10. Общие идеи специальной теории относительности и диалектический материализм	122
Глава III. Пространство и время в общей теории отно- сительности и космологии	135
§ 11. Пространство и время в ускоренной системе отсчета	135
§ 12. Пространство, время, тяготение	143
§ 13. Пространственно-временной «фон» известной части мира	155
§ 14. Проблемы пространства и времени в общей теории относительности	164
Глава IV. Проблема делимости пространства и времени	174
§ 15. Точечное событие в доквантовой физике	174
§ 16. Проблема локализации в квантовой механике	178
§ 17. «Точечное событие» в квантовой теории поля. Идея нелокальности	197
Глава V. Свойства симметрии пространства и времени	220
§ 18. Проблема трехмерности пространства. Необрати- мость времени	220
§ 19. Преобразования отражения пространства и времени	228
Заключение	232

ПРЕДИСЛОВИЕ

Задача этой книги — анализ современных философских проблем пространства и времени. В ней не дается подробного изложения истории вопроса. Исторический материал привлекается лишь для обоснования главной идеи, положенной в основу книги, идеи о том, что развитие научных понятий пространства и времени происходит в соответствии с развитием общих представлений о материи, движении, взаимодействии и что, следовательно, уяснить сущность этих понятий можно только в связи с анализом научной картины мира в целом. Эта идея с необходимостью вытекает из мировоззрения диалектического материализма.

Книга рассчитана прежде всего на физиков и философов. Но мне хотелось сделать ее доступной также для более широкого круга читателей, интересующихся философскими вопросами естествознания. Поэтому в ней попутно (и очень кратко) излагаются основные положения теории относительности и квантовой теории, необходимые для анализа современных представлений о пространстве и времени.

Я очень благодарен И. В. Кузнецову, Ю. Б. Румеру, С. Г. Суворову и И. С. Шапиро, прочитавшим книгу в рукописи и сделавшим много ценных критических замечаний, которые я постарался учесть при подготовке рукописи к печати.

Р. Штейнман

Москва,
ноябрь 1961 г.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы пространства и времени всегда представляли большой интерес для естествоиспытателей и философов. Этот интерес объясняется двумя причинами. Во-первых, концепция пространства и времени является составной частью миропонимания в целом; научные представления о пространстве и времени находятся в соответствии с общими научными представлениями о материи, движении, взаимодействии. Во-вторых, познание свойств пространства и времени необходимо для решения принципиальных проблем физики и космологии.

Связь между концепцией пространства и времени и картиной мира в целом может быть прослежена на протяжении всей истории науки; она отчетливо выявляется уже на самых первых этапах научного познания.

Еще в древности возникли две различные концепции пространства. Атомисты (Демокрит, Эпикур, Лукреций) утверждали, что существует бесконечное мировое пустое пространство, которое служитместилищем вещей, ареной движения тел. Такое представление о пространстве соответствовало взглядам атомистов на природу вещей; материя рассматривалась ими как совокупность бесконечного числа неизменных по форме и величине частиц — атомов, образующих при сцеплении друг с другом все многообразие тел природы. «Полное» и «пустое» — это два неразрывно связанных понятия: атомы материи (абсолютно «полное») могут существовать и двигаться только при наличии «пустого»местилища.

Концепция пустого пространства отвергалась противниками старого атомизма, прежде всего Аристотелем. Они отвергали саму идею атомизма, так как полагали, что случайные сочетания неизменных частиц не могут обусловить

качественное своеобразие и целостность вещей, их специфические закономерности. Материя, по Аристотелю, хотя и является субстратом вещей, но движущее, активное начало — это форма. Отрицание атомизма влекло за собой и отрицание пустого пространства. Не может существовать пустота, утверждал Аристотель, ибо пустота — это нечто, имеющее величину, и вместе с тем ничто, бестелесное начало, ни на что не действующее и не подвергающееся воздействию. Аристотель рассматривал пространство как совокупность мест, занимаемых телами.

В соответствии с различным пониманием пространства атомисты и их противники по-разному представляли себе и движение.

Таким образом, с самого начала развития философии возникли различные концепции пространства. Борьба между ними развернулась с новой силой в эпоху формирования современного естествознания в 17—18 веках. Идея пустого мирового пространства была далее развита Ньютоном, разработавшим также и понятие абсолютного «пустого» времени. Аристотелевское же понимание пространства и времени легло в основу концепции Лейбница. С анализа этих двух основных концепций начинается первая глава книги, посвященная эволюции воззрений на пространство и время в физике и в философии 17—19 веков.

Мы отметили, что развитие научных понятий пространства и времени может быть понято лишь в связи с преобразованием физической картины мира в целом. С другой стороны, анализ противоречий, имеющих в концепции пространства и времени, необходим для выяснения причин появления трудностей в решении наиболее общих физических проблем. С такими трудностями физика столкнулась, в особенности к концу 19 века, в электродинамике и оптике движущихся сред.

Как известно, коренное преобразование представлений о пространстве и времени произошло в начале 20 века в результате создания теории относительности. Оно было подготовлено фундаментальными открытиями в физике, прежде всего открытием электромагнитного поля и законов движения электронов. В философии 19 века значительную роль в подготовке современных представлений о пространстве и времени сыграла также критика ньютоновой концепции

с одной стороны, и субъективистских воззрений на пространство и время, с другой.

Однако подлинный смысл глубокого преобразования понятий пространства и времени в теории относительности не был сразу уяснен. В литературе — вплоть до последних лет — продолжают дискуссии на эту тему. Можно показать, что различные трактовки теории относительности связаны именно с различным философским пониманием пространства и времени. Мы приведем здесь



Рис. 1. Релятивистское замедление времени.

пример, показывающий, как разногласия по одному из принципиальных вопросов теории относительности возникают из различия в философских взглядах спорящих сторон.

В 1956 г. в апрельской книжке журнала «Nature» были опубликованы дискуссионные статьи двух английских авторов — Маккри и Дингле. Спор шел о неоднократно обсуждавшемся вопросе — о реальности релятивистского замедления времени. Напомним существо этого вопроса. Пусть часы, связанные с телом B (рис. 1), движутся в течение некоторого времени относительно инерциальной системы отсчета K с постоянной скоростью v_0 , удаляясь от неподвижных в этой системе часов A . Предположим, что первоначально, при совпадении, часы B и A (совершенно одинаковые по своему устройству) показывали одно и то же время. Пусть затем часы B попадают в тормозящее локальное поле MN и возвращаются обратно, двигаясь после выхода из области действия поля со скоростью $-v_0$. Для простоты предположим, что поле в области MN — однородное поле тяготения. Согласно теории относительности, часы B , проходя в обратном направлении мимо часов A , покажут по отношению к этим часам отставание,

равное¹⁾

$$\tau = \frac{v_0^2}{c^2} \left(\frac{T}{2} - \frac{2}{3} t^* \right), \quad t^* \leq T,$$

где T — промежуток времени между встречами часов B и A , t^* — длительность ускоренного движения часов B .

Очевидно, какой бы системой отсчета мы ни пользовались для расчета хода обоих часов, мы всегда должны получить однозначный результат: часы B при повторной встрече с часами A будут отставать от последних на величину τ . По-видимому, в недалеком будущем можно будет проделать соответствующий опыт, например, в межпланетной ракете. В связи с этим и возник спор между Маккри и Динглом.

Маккри произвел подсчет для замедления часов и указал на реальную возможность проверки его на опыте в будущем. Дингл возразил, что эффект замедления часов вообще не может быть реальным, поскольку движение обоих часов — B и A — происходит друг относительно друга. Поэтому, по мнению Дингла, можно с одинаковым основанием считать часы A движущимися, а часы B неподвижными, и, следовательно, в этом случае эффект должен был бы быть обратным, т. е. часы A — если условиться считать их движущимися — должны были бы настолько же отставать от часов B , насколько часы B , согласно приведенному расчету, отстают от часов A . Но вывод об отставании обоих часов друг от друга не имеет смысла. Следовательно, эффект отставания движущихся часов, по Динглу, не имеет реального физического значения. Величина отставания τ , по мнению Дингла, получается как следствие условной процедуры измерения времени, принятой в теории относительности. Таким образом, Дингл утверждает, что релятивистское сокращение времени вообще не является объективным физическим фактом и никогда не может быть обнаружено на опыте.

Как видно, спор сводится, во-первых, к вопросу о том, отражает ли теория относительности объективные свойства времени, т. е. свойства времени, не зависящие от способа

¹⁾ В. А. Фок, Теория пространства, времени и тяготения, Гостехиздат, М.—Л., 1955, стр. 287.

их познания, или же она основана на условном соглашении о способе измерения времени и пространства в различных системах отсчета. Во-вторых, спор идет о том, действительно ли течение времени зависит от движения тел и, следовательно, существуют ли какие-либо способы влиять на ход времени.

Этот пример показывает, что физическая проблема — отставание движущихся часов — непосредственно связана с философской проблемой, с пониманием сущности времени и процесса его познания.

Естественно, что анализ современных научных понятий пространства и времени, разработанных теорией относительности (как специальной, так и общей), занимает центральное место в этой книге (главы II и III).

Мы уже говорили о том, что выяснение свойств пространства и времени имеет важное значение для разрешения трудностей современной физики. Это относится прежде всего к теории элементарных частиц. Наибольший интерес в последние годы вызвали две проблемы: о простейших «элементах» пространства и времени и об общих свойствах симметрии этих форм. Вопрос о том, какой физический смысл имеет «точка пространства» и «мгновенное событие», дебатировавшийся в философии еще в средние века, стал предметом обсуждения в физике в связи с квантовой механикой. Он приобрел особенно актуальный характер в современных нелокальных и нелинейных вариантах квантовой теории поля. Гипотеза о квантовании пространства и времени, впервые высказанная 30 лет тому назад, послужила исходным пунктом для ряда исследований.

Проблемы симметрии пространства и времени также стали актуальными в последние годы в связи с открытием несохранения четности. Обе эти проблемы будут рассмотрены в IV и V главах книги.

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ И ФИЛОСОФИИ 17—19 ВЕКОВ

§ 1. Концепция Ньютона

1. Ньютоновы воззрения на пространство и время были почти общепринятыми в течение двух веков. Концепция Ньютона настолько глубоко проникла в научное мышление, что даже после появления теории относительности, явно с ней несовместимой, ньютоновы представления о существовании пустого пространства и времени — правда, с весьма странными для «пустоты» свойствами — еще долго сохранялись в физике (и до конца не изжиты и поныне). Немало споров и возражений против теории относительности было вызвано этой необычайной живучестью ньютоновых взглядов. Напомним, в чем заключается ньютонова концепция.

Ньютон рассматривал пространство как пустоеместилище вещей. Оно бестелесно, т. е. абсолютно пронизуемо, ни на что не действует и не подвергается воздействию. Оно трехмерно, непрерывно, неподвижно, бесконечно, однородно и изотропно, его части ничем не отличаются друг от друга. Это — бесконечный «ящик без стенок», чистая протяженность, как таковая. Пространственные отношения везде одни и те же. Геометрия пространства универсальна; это — геометрия Евклида.

От пространства, как такового («абсолютного пространства»), Ньютон отличает протяженность тел. Протяженность — основное свойство материальных тел, благодаря которому они занимают определенные места в простран-

стве, совпадают с этими местами. Протяженность — не только всеобщее свойство материальных объектов, но — если говорить о простейших частицах (атомах) — и изначальное, первичное свойство, не требующее объяснения.

Абсолютное пространство, вследствие неразличимости своих частей, неизмеримо и непознаваемо. Мы можем измерять расстояния только между «материальными точками» и углы между направлениями прямых, проходящих через эти точки. Положение тела можно определять только по отношению к другим телам. Другими словами, наука и практика имеют дело только с относительным пространством. Это название также было дано Ньютоном.

Ньютон писал: «Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным.

Относительное есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению ее относительно некоторых тел и которая в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное; таково, например, протяжение пространств подземного воздуха или надземного, определяемых по их положению относительно Земли»¹⁾.

Каково же отношение между относительным и абсолютным пространствами? На этот вопрос Ньютон отвечает так: «По виду и величине абсолютное и относительное пространства одинаковы, но численно не всегда остаются одинаковыми. Так, например, если рассматривать Землю подвижной, то пространство нашего воздуха, которое по отношению к Земле остается всегда одним и тем же, будет составлять то одну часть пространства абсолютного, то другую, смотря по тому, куда воздух перешел, и следовательно, абсолютное пространство беспрерывно меняется»²⁾.

Время в концепции Ньютона само по себе есть нечто абсолютное и ни от чего не зависящее, чистая длительность, как таковая, равномерно текущая от прошедшего к будущему. Оно является «вместилищем событий»; ход

¹⁾ И. Н ь ю т о н, Математические начала натуральной философии, Изд-во АН СССР, М.— Л., 1936, стр. 30.

²⁾ Там же.

событий не влияет на течение времени. Время одномерно, непрерывно, бесконечно, везде одинаково (универсально), однородно.

От абсолютного времени, также неизмеримого, Ньютон отличает относительное время. Он пишет: «Абсолютное, истинное математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью».

Относительное, кажущееся или обыденное время есть или точная, или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как-то: час, день, месяц, год»¹). Измерение времени осуществляется только с помощью «часов», т. е. движений, которые принимаются за равномерные.

Рассматривая вопрос о соответствии относительного времени абсолютному, Ньютон указывает на трудности установления такого соответствия. В качестве наиболее точных часов принималось обращение Земли вокруг Солнца. Но уже и тогда астрономам была известна неравномерность хода этих часов, которая учитывается уравнением времени. Ньютон указывал, что идеальных часов, которые показывали бы абсолютное время, возможно, вообще не существует в природе.

Пространство и время в концепции Ньютона независимы друг от друга. Конечно, тела существуют и в пространстве и во времени. Но оба эти «вместилища» совершенно не связаны друг с другом. Закономерности пространства и времени не имеют ничего общего. Независимость пространства и времени проявляется, прежде всего, в том, что расстояние между двумя точками и промежуток времени между двумя событиями сохраняют свои значения независимо друг от друга в любой системе отсчета, т. е. в любом относительном пространстве и относительном времени. Эта независимость выражена в преобразованиях Галилея, имеющих место при переходе от одной системы отсчета к другой.

¹) И. Ньютон, Математические начала натуральной философии, Изд-во АН СССР, М.—Л., 1936, стр. 30.

В соответствии со своими воззрениями на пространство и время Ньютон решает вопрос о движении. Он различает абсолютное и относительное движение (в частности, абсолютный и относительный покой). Абсолютное движение — это перенос тела из одного абсолютного места (т. е. из определенной части абсолютного пространства) в другое. Отношение пройденного телом абсолютного расстояния к определенному промежутку абсолютного времени, в течение которого происходит движение тела, дает абсолютную скорость тела. Соответственно можно определить и абсолютное ускорение.

Относительным движением является перенос тела из одного относительного места (т. е. положения по отношению к какому-либо другому телу) в другое относительное же место. Относя это движение к промежутку относительного времени, в течение которого оно совершается, мы получаем относительную скорость тела, которая может быть совершенно отличной от абсолютной скорости.

Чем же отличается относительное движение от абсолютного? Имеются ли принципиальные различия в закономерностях абсолютного и относительного движения? Этот вопрос имеет важное принципиальное значение для механики. Мы подробнее рассмотрим его в следующем пункте. Здесь же заметим, что Ньютон усматривал существенное отличие этих видов движения в том, что абсолютное движение тела возникает или изменяется по своей скорости только под действием внешней силы, непосредственно приложенной к данному телу; относительное же движение тела может изменять свою скорость и при отсутствии воздействующей на него внешней силы, а в результате действия сил на другие тела, по отношению к которым рассматривается движение данного тела.

Такова ньютонова концепция пространства и времени.

2. Как возникла концепция Ньютона? Чем объяснить ее «очевидность» в течение двух веков?

Ньютоновы представления о пространстве, как мы уже отмечали во введении, восходят к древности — к атомистам. Они были органической частью атомистических воззрений на материю, которых придерживался Ньютон. Неизменные атомы материи могут существовать и

двигаться только в пустоте. Как и древние атомисты, Ньютон приписывал элементарным частицам материи два первичных, изначальных свойства — протяженность и абсолютную непроницаемость; к этим свойствам он добавляет еще свойство инертности — способность сохранять состоящие движения в отсутствие внешних сил.

Как известно, воззрения атомистов победили в науке только после длительных споров. Пустое пространство долгое время не признавалось. В течение средних веков господствовала натурфилософия Аристотеля, отвергавшая самую возможность пустоты. Только после открытия в 17 веке вакуума представление о пустом пространстве стало находить сторонников.

Но даже в середине 17 века, когда существование вакуума уже считалось бесспорным, естествоиспытатели и философы в большинстве своем придерживались взглядов Декарта, что протяженность есть атрибут материи и, следовательно, пустоты не существует; с этой точки зрения, вакуум — это область, в которой нет выделенных частиц вещества. По Декарту, принципиального отличия материальных частиц (корпускул) от окружающей сплошной протяженной среды не существует. Корпускулы (а также большие тела) выделяются из среды (мирового эфира) лишь благодаря своему движению относительно этой среды (декартовские вихри). Только после критики Ньютона, доказавшего, что «в заполненном пространстве», или в эфире, были бы невозможны длительные движения небесных тел, убеждение в правильности картезианских воззрений было подорвано. Правда, сам Ньютон также сомневался в наличии пустоты в порах тел, но он был совершенно убежден в том, что в макром мире тела отделяются друг от друга пустым пространством. После Ньютона пустое пространство было признано многими позднейшими последователями Декарта, которые рассматривали эфир не как сплошную среду, а как газ, т. е. как совокупность особых («тонких») частиц, разделенных пустотой.

Представление об абсолютном, неизменном, универсальном пространстве, изотропном, однородном не только в малых, вблизи каждой точки, но и в больших областях, опиралось на евклидову геометрию. Евклидово пространство является «плоским» и однородным в любой сколь

угодно большой области, изотропным и бесконечным. Однородность евклидова пространства в «большом» проявляется в основном положении евклидовой геометрии о подобии одинаковых фигур (например, треугольников) независимо от их размера. Как было показано в дальнейшем, это положение геометрии Евклида равнозначно ее пятой аксиоме — о параллельных (см. § 4). Вплоть до начала 19 века евклидова геометрия считалась единственной, универсальной геометрией реального пространства¹⁾.

Эта общность свойств евклидова пространства и абсолютного пространства Ньютона в настоящее время представляется вполне естественной, поскольку и то и другое явилось абстракцией мира идеально твердых, недеформируемых тел. Ньютонovo пустое мировое пространство можно рассматривать как бесконечное, непрерывное, идеально твердое тело, отличающееся от обычных материальных тел своей абсолютной проницаемостью и неподвижностью (твердый «каркас»).

Понятие абсолютного времени впервые было четко сформулировано Ньютоном. Сравнительно поздняя разработка этого понятия объясняется тем, что в философской картине мира древних время играло гораздо менее существенную роль, чем пространство. Наука о природе с ее точными количественными закономерностями, выражающими зависимости физических величин от времени, находилась в зачаточном состоянии. В центре внимания были проблемы статики, для которых понятие времени несущественно. Только после создания динамики появилась потребность в более глубоком анализе понятия времени.

¹⁾ Бесконечность также является необходимым свойством плоского евклидова пространства. Понятие о бесконечном пространстве находится в соответствии с идеей бесконечного числа материальных частиц и тел, впервые четко сформулированной древними атомистами и возрожденной Джордано Бруно. Однако концепция Ньютона не исключала и конечности числа материальных тел, «помещенных» в бесконечном пространстве. Например, известный последователь Ньютона С. Кларк не исключал возможности, что весь мир инерциально движется в пустом пространстве; ср. пункт 4 третьего письма Кларка в его полемике с Лейбницем (Пolemика Г. Лейбница и С. Кларка, Изд-во ЛГУ, 1960, стр. 51).

Логически идея абсолютного времени вполне соответствует представлению о материи как совокупности неизменных инертных частиц, которые могут находиться в абсолютном покое. С абсолютно покоящейся частицей ничего не происходит, она просто существует во времени. И пустое пространство (поскольку оно признается) также существует во времени. Следовательно, в этой картине мира время выступает как «вместилище», которое может быть «наполнено» явлениями, но может быть и «пустым»; в нем может ничего не происходить.

Представление о том, что время течет равномерно, что оно однородно, возникло еще в древности. Точное измерение длительности различных движений возможно только путем сопоставления их с периодическим процессом, являющимся «представителем» времени. Аристотель определял время как «число движений» и указывал на равномерность его течения в отличие от движений тел. Однако у Аристотеля еще встречаются высказывания о субъективности времени. Идея объективности времени была необходимой предпосылкой для создания основ динамики и впервые была четко сформулирована Ньютоном.

3. Соответствие понятий абсолютного пространства и абсолютного времени классической механике, единственной в тот период системе научных представлений о движении тел, — такова важнейшая причина жизненности ньютоновой концепции.

В самом деле, классическая механика (как и любая другая отрасль науки, как и вся практика) имеет дело только с относительным пространством и временем. Положение тела в каждый момент времени, а следовательно и его движение, может быть определено только путем отнесения его к другим телам, условно выбранным за неподвижные, и к определенным «часам». Другими словами, при решении любой механической задачи нужно прежде всего выбрать систему отсчета, т. е. совокупность неподвижных друг относительно друга твердых тел, играющих роль базиса отсчета, и равномерно текущий процесс, определяющий относительное время события. Но законы ньютоновой механики справедливы не в любой системе отсчета; любая, как угодно движущаяся, система отсчета непригодна для этой

цели. Обратимся, например, к первому закону механики: «тело, на которое не действуют внешние силы, движется равномерно и прямолинейно». Но относительно каких тел и по каким часам определяется инерциальное движение? Очевидно, если сама система отсчета движется не инерциально, то в такой системе отсчета первый закон не имеет места. Это же рассуждение справедливо и для второго закона механики («сила, действующая на данное тело, вызывает ускорение, обратно пропорциональное его массе»). Этот закон также справедлив лишь по отношению к определенным системам отсчета. Каковы же системы отсчета, по отношению к которым верны законы Ньютона?

Согласно механике, законы Ньютона верны только по отношению к системам отсчета, которые называют инерциальными. Но каков критерий инерциальности системы отсчета?

В настоящее время на этот вопрос дается иной ответ, чем во времена Ньютона. Инерциальные системы отсчета определяются как такие системы, в которых верен закон инерции. Таким образом, первый закон используется для определения инерциальной системы; это означает, что он может быть проверен на опыте не непосредственно, а только по истинности следствий, вытекающих из данного определения. Причину такого истолкования закона инерции мы рассмотрим ниже, в § 5. В эпоху же Ньютона и в последующий период развития механики — вплоть до середины 19 века — думали по-другому: инерциальными системами являются системы тел, движущиеся инерциально (в частности, покоящиеся) по отношению к абсолютному пространству и абсолютному времени. Такой ответ во времена Ньютона представлялся единственно разумным. Он находился в соответствии с общим понятием материи как совокупности тел (частиц), движущихся в абсолютном вакууме. Этому понятию материи соответствует представление о движении отдельного тела, как такового. Тело может находиться в движении или в покое безотносительно к чему-либо. То обстоятельство, что для определения движения тела (его скорости или ускорения) мы вынуждены относить движение к какой-либо системе отсчета, в классической механике рассматривалось только как свойство

процесса измерения, а не как существенная особенность самого движения.

И сам Ньютон, и сторонники его концепции пространства и времени (Кларк, Эйлер и другие) уделили много внимания обоснованию своих взглядов на соотношение между абсолютным и относительным движениями. Этот вопрос имел принципиальное значение и был очень важен для механики.

Как известно, принцип относительности классической механики, сыгравший большую роль в динамике и в астрономии, устанавливает равноправность всех инерциальных систем по отношению к механическим процессам. Согласно этому принципу, механические процессы протекают по одинаковым законам в любой инерциальной системе. Из него следует, что принципиально нет возможности определить абсолютную скорость тела. Этот вывод создавал несомненную трудность для концепции абсолютного движения, поскольку скорость такого движения оказывалась неизмеримой. Однако Ньютон усмотрел известный выход из трудности в том, что опыт позволяет провести абсолютную грань между инерциальным движением отдельного тела и ускоренным движением.

Нельзя измерить абсолютную скорость отдельно взятого тела, но узнать, движется ли оно инерциально или ускоренно, можно. Для этой цели Ньютон проделал свой знаменитый опыт с вращающимся сосудом, наполненным водой. До тех пор, пока вода не увлекается вращающимся сосудом, поверхность ее остается плоской; когда же благодаря трению вода в сосуде приводится во вращательное движение, ее поверхность искривляется, принимая форму параболоида вращения. Следовательно, по динамическим эффектам можно судить, вращается ли вода «сама по себе», безотносительно к стенкам сосуда, другими словами, испытывает ли вода ускорение или же не испытывает. То же самое справедливо для любого ускоренного движения. Имеется динамический критерий, позволяющий определять абсолютное ускорение тела самого по себе, безотносительно к другим телам. При этом несущественно, находятся ли вблизи тела другие массы. Ньютон утверждал, что если бы существовали только два вращающихся друг относительно друга шара, бесконечно удаленных от дру-

гих тел, то можно было бы решить, какой шар вращается абсолютно: этот шар сплющивался бы вдоль оси вращения. Относительно же вращающийся шар не испытывал бы никакой деформации.

Таким образом, абсолютность ускорения рассматривалась Ньютоном как доказательство существования абсолютного движения и, следовательно, абсолютного пространства и времени. Классическая механика оказалась важнейшей опорой ньютоновой концепции пространства и времени.

4. Ньютонова концепция опиралась и на представления того времени о взаимодействии тел. Как известно, имелись два основных направления, по-разному представлявшие механизм взаимодействия: динамическое и кинетическое. Сторонники динамического направления сводили любые взаимодействия к силам, так или иначе связанным с частицами материи и действующим мгновенно на расстоянии (дальнодействие).

Динамизм был преобладающим направлением в физике в течение двух веков. Дальнодействующими считались и силы тяготения, и электрические силы, и магнитные, и любые другие. Казалось вполне естественным, что абсолютное пустое пространство не представляет препятствия для передачи действия силы от одного тела к другому и что передача действия совершается мгновенно. Если бы не было пустого пространства, то мгновенность действия сил на расстоянии представлялась бы загадочной, поскольку среда, разделяющая взаимодействующие тела, должна была бы играть существенную роль в передаче действия. Следовательно, признание пустого пространства было необходимой основой динамизма.

Динамизм подкреплял и представление об абсолютном времени. Мгновенность передачи действия от тела к телу делает весь мир единой материальной системой с единым, универсальным временем. Наличие обособленных тел (скоплений материи) не меняет того обстоятельства, что любое явление, любое изменение, где бы оно ни произошло, мгновенно отражается во всем мире (разумеется, эффект этого изменения будет различен в разных местах, поскольку действие любой силы зависит от расстояния). Поэтому естественно думать об одинаковом течении времени во

всем мире, о единственном абсолютном универсальном времени ¹⁾.

Однако не только динамическая концепция взаимодействия, но и противоположная ей концепция — кинетическая (одна из форм идеи близкодействия) также не противоречила представлениям об абсолютном пространстве и времени. Как уже было сказано, сторонники кинетического направления (Эйлер, Ломоносов, Бернулли и другие), отрицавшие мгновенное дальнодействие, были последователями атомизма. Они сводили всякое взаимодействие к столкновениям частиц материи. Но само столкновение считалось ими мгновенным.

Будучи атомистами, представлявшими материю как совокупность в конечном счете неделимых частиц, они признавали существование пустого пространства. В силу этого же они признавали и абсолютное время, поскольку, как уже было отмечено выше, абсолютный покой частицы есть существование во времени, не связанное с какими-либо изменениями или событиями.

Таким образом, ньютонова концепция находилась в соответствии с научной картиной мира, господствовавшей в физике в течение двух столетий. И все же, несмотря на прочность научных (физических, геометрических и философских) устоев ньютоновой концепции пространства и времени, она не была единственной. Ей противостояла концепция Лейбница.

§ 2. Концепция Лейбница

1. Основное отличие лейбницевой концепции пространства и времени от ньютоновой состоит в том, что в первой отвергается представление о пространстве и времени как

¹⁾ Примечательно, что представление о мире в целом, как о единственной абсолютной системе, было использовано Ньютоном в его попытке разрешить трудность, возникшую в его концепции пространства и времени в связи с принципом относительности. Ньютон указывает, что если выбрать в качестве системы отсчета такую систему, начало которой покоится в центре масс вселенной, то мы получим абсолютную систему отсчета; скорости движения тел в этой системе будут абсолютными. Нетрудно понять ошибочность этого рассуждения: понятие центра масс не имеет смысла применительно к бесконечной вселенной (а Ньютон признавал, что вселенная бесконечна).

самостоятельных началах бытия, существующих наряду с материей и независимо от нее. По Лейбницу, пространство — это порядок взаимного расположения множества индивидуальных тел, существующих вне друг друга, время — порядок сменяющих друг друга явлений или состояний тел. Лейбниц пишет: «Я неоднократно подчеркивал, что считаю *пространство*, так же как и *время*, чем-то чисто относительным: пространство — *порядком сосуществований*, а время — *порядком последовательностей*»¹⁾. И далее: «Говорят, что пространство не зависит от положения тел. На это я отвечаю, что оно, конечно, не зависит от того или иного положения тел, тем не менее оно является таким порядком, который делает возможным само *расположение тел* и в силу которого они в своем существовании друг подле друга обладают отношением расположения, подобно тому как время представляет собой тот же порядок в смысле последовательности их существования».

В своем последнем (пятом) письме Лейбниц пишет: «Я доказал, что пространство представляет собой не что иное, как порядок существования вещей, рассматриваемых в их одновременности». По Лейбницу, пространство и время вне вещей и вне процессов — это чисто идеальные представления, абстракции, созданные человеком.

Характеристика пространства как порядка вещей и времени, как порядка явлений вызвала естественные возражения со стороны последователей Ньютона (в особенности Кларка). Во-первых, в понятие порядка обычно включается только относительное расположение; но различные тела в данном «порядке» могут иметь разные размеры (протяженности), а различные состояния в соответствующем «порядке» — разные длительности; следовательно, термин «порядок» не исчерпывает содержания пространства или времени. Во-вторых, указывали они, пространство безразлично к своему содержанию: данное тело может покинуть свое место, а область пространства, в котором оно находилось, все же сохранится, как таковая; то же можно сказать и о единичном процессе.

¹⁾ Полемика Г. Лейбница и С. Кларка, Изд-во ЛГУ, 1960, стр. 47.

Отвечая своим оппонентам, Лейбниц расширяет смысл слова «порядок». Он указывает, что в понятие «порядка» следует включить и понятие относительной величины. Он пишет: «Порядок также имеет свою величину: ведь существуют в нем предыдущий и последующий члены, а следовательно, расстояние и промежуток»¹⁾. В другом месте он пишет: «Мне здесь возражают, что время якобы не может быть порядком следующих друг за другом вещей, так как величина его может меняться, между тем как последовательность остается той же самой. Я отвечаю, что это последнее не имеет места: напротив, для увеличения или уменьшения времени необходимо требуется увеличение или уменьшение промежуточных ступеней между существующими друг за другом состояниями, ибо в самом времени, так же как и в пространстве, не имеется ни пустого, ни уплотнения или проникновения»²⁾.

Таким образом, в концепции Лейбница пространство есть совокупность отношений величин и ориентации множества сосуществующих вещей, внешних друг к другу и ограничивающих друг друга. Время есть совокупность отношений длительностей сменяющих друг друга состояний.

Понятие протяженности отдельного тела, рассматриваемого безотносительно к другим, в концепции Лейбница не имеет смысла. Пространство есть отношение («порядок»), применимое лишь ко многим телам, к «ряду» тел. Можно говорить только об относительном размере данного тела, в сравнении с размерами других тел. Если бы других тел не существовало, то нельзя было бы говорить о протяженности данного тела. Это понятие имеет смысл лишь постольку, поскольку тело рассматривается как часть мира. То же можно сказать и по отношению к длительности. Понятие длительности применимо к отдельному явлению постольку, поскольку оно рассматривается как звено в единой цепи событий.

В этом с особой отчетливостью проявляется кардинальное отличие лейбницево́й концепции от ньютоновой, в которой протяженность присуща телу независимо от того,

¹⁾ Полемика Г. Лейбница и С. Кларка, Изд-во ЛГУ, 1960, стр. 82.

²⁾ Там же, стр. 93.

существуют другие тела или не существуют, а длительность — единичному явлению самому по себе.

Отличие лейбницева понимания пространства от ньютонова может быть наглядно показано следующим образом. Представим себе, что линейные размеры всех тел в мире, а также все расстояния между ними абсолютно увеличились в одинаковое число раз. С точки зрения Ньютона, такое изменение размеров означало бы реальное увеличение как пространства, так и самих протяженных тел. С точки зрения Лейбница, этот пример вообще не имеет смысла, так как внешние отношения тел остались бы такими же, а вне отношений тел говорить о пространстве невозможно.

По мнению ньютонианцев, пространство и время не являются отношениями. Это подчеркивается Кларком в следующих словах: «...Время и пространство имеют природу не пропорций, а абсолютных величин, входящих в пропорции...».

Важнейшая особенность лейбницевой концепции пространства и времени состоит в том, что протяженность тел и длительность состояний не считаются первичными свойствами, ни от чего не зависящими. Они определяются силами, присущими телам и обуславливающими их состояние. Лейбниц пишет: «Не только свет, тепло и цвет и подобные свойства суть явления; к явлениям относятся также и протяжение». И далее: «Я остаюсь при своем утверждении, что протяжение есть голая абстракция и что для своего объяснения оно требует тела. Оно предполагает в последнем свойство, атрибут, естество, которое протягивается, распространяется и продолжается. Протяжение есть распространение этого свойства или естества; так, в молоке есть протяжение или распространение белого цвета, в бриллианте протяжение или распространение твердости, в теле вообще протяжение или распространение антиипии (сопротивления — *Р. III.*) или материальности. Следовательно, в теле есть сила, предшествующая всякому протяжению»¹⁾. В этом пункте Лейбниц кардинально расходится с Декартом, для которого протяженность есть

¹⁾ К. Ф и ш е р, История новой философии, т. III. Лейбниц, его жизнь, сочинения и учения, СПб, 1905, стр. 372.

первичное свойство, атрибут материи. Свойства протяженности и длительности, по Лейбницу, обусловлены силами, и это относится не только к большим телам, но и к простейшим частицам. Таким образом, лейбницева концепция пространства и времени динамична. Тело протяженно постольку, поскольку оно препятствует другим телам проникнуть в область своего пребывания, поскольку оно обладает непроницаемостью, т. е. проявляет по отношению к окружающим его телам силу отталкивания. Следовательно, величина протяженности определяется величиной и распределением сил отталкивания.

Кант, который в ранние годы своей деятельности был в основном последователем Лейбница в проблеме пространства и времени, развил динамическое обоснование протяженности. Он указывал, что протяженность тел должна обуславливаться соотношением сил притяжения и отталкивания, присущих любому телу, любой частице материи. Сила притяжения связывает части тела воедино, сила же отталкивания определяет область существования (границу) тела. Равновесие сил притяжения и отталкивания приводит к определенному значению протяженности тела.

Динамическая сущность концепции Лейбница в отношении времени проявилась в том, что время у него связывается с причинностью. Время есть характеристика смены состояний или явлений, поэтому последовательность их во времени связана с причинным отношением; поскольку причина всегда должна предшествовать следствию (действию), то время есть условие причинной зависимости событий друг от друга.

В соответствии со своими воззрениями на пространство и время Лейбниц развивает учение о движении. Он рассматривает движение только как относительное перемещение одного тела по отношению к другому. Лейбниц пишет: «Движение, если отвлечься от силы, т. е. поскольку оно рассматривается в чисто геометрическом понимании, в действительности есть не что иное, как изменение положения». Следовательно, движение в этом аспекте является только относительным. О трудностях, связанных с таким пониманием движения, мы скажем позднее.

2. Как возникла лейбницева концепция пространства и времени? Каковы ее исторические и логические корни?

Можно утверждать, что воззрения Лейбница на пространство и время являются обобщением непосредственного опыта. Хотя взгляды Ньютона в более поздние эпохи казались простыми и самоочевидными, тем не менее лейбницева концепция «первична» по отношению к ньютоновой. Опыт не дает нам никаких данных о существовании пространства и времени как самостоятельных объектов, ни от чего не зависящих. На опыте мы имеем дело только с протяженными телами и длящимися процессами, занимающими определенное положение относительно других тел и процессов. Поэтому ньютоновы понятия абсолютного пространства и времени представляют собой далеко идущие абстракции.

Исторически понятие пространства возникло как обобщение понятия места, которое включает в себя как представление о положении какого-либо тела относительно других тел, так и представление о протяженности тела, его размере (это было отмечено Лейбницем). Это естественно возникающее из повседневного опыта (и прежде всего из геометрических измерений) понятие пространства было в развитой форме впервые изложено Аристотелем. Понятие места у Аристотеля характеризуется следующим образом:

- 1) место предмета не есть часть или свойство самого предмета, но есть то, что его ограничивает, охватывает;
- 2) содержание места предмета не меньше и не больше, чем предмет сам по себе;
- 3) место предмета может отсутствовать для данного предмета, и предмет отделим от него.

Следовательно, место тела есть его ограничение другими телами.

Кроме этих признаков места, Аристотель еще приписывал месту четвертый признак, а именно он связывал специфику места в мировом порядке с расположением основных элементов материи. Каждый элемент материи, по Аристотелю, стремится занять свое место в мире. Если не говорить об этом телеологическом признаке, который был отброшен современным естествознанием с самого начала его развития, то остаются первые три. Пространство, по Аристотелю, есть не что иное, как совокупность мест.

Время рассматривалось Аристотелем как внешняя количественная характеристика процессов. Он называет

время «числом движений». Такое представление о времени возникает потому, что измерение времени всегда основано на установлении совпадения сменяющих друг друга фаз какого-либо периодического процесса («часов») с рядом событий, следующих друг за другом, и подсчете числа равных периодов, прошедших между началом и концом исследуемого процесса.

Анализируя понятие времени, Аристотель пишет: «Когда... есть прежде и после, тогда мы говорим о времени, ибо время есть не что иное, как число движений по отношению к предыдущему и последующему. Таким образом, время не есть движение, а является им постольку, поскольку движение имеет число. Доказательством служит то, что большее или меньшее мы оцениваем числом, движение же, большее или меньшее,—временем, следовательно, время есть известное число. А так как число имеет двоякое значение: мы называем числом, с одной стороны, то, что сосчитано и может быть сосчитано, с другой,—посредством чего мы считаем, то время есть именно число считаемое, а не посредством которого считаем. И как движение всегда является иным и иным, так и время»¹⁾.

Отличие времени от движения, по Аристотелю, проявляется в том, что время течет всегда равномерно, что оно не может быть «скорым или медленным», а лишь «большим и малым, долгим и коротким», т. е. представляет собой экстенсивное число. В частности, временем измеряется также и покой.

Таковы исторические корни концепции Лейбница.

Логически воззрения Лейбница на пространство и время связаны с его мировоззрением в целом, с его динамической картиной мира. Основным свойством частиц Лейбниц считал активность, извечное стремление к действию и движению. Атомистическая картина материи представлялась ему неудовлетворительной. Критикуя ньютонову концепцию пространства, Лейбниц указывает, что она основана на представлении об абсолютной твердости атомов. В действительности нет оснований для такого предположения. Не существует в мире тел или частиц абсолютно твердых, «...напротив, первоначальным является

¹⁾ Аристотель, Физика, Соцэкгиз, 1936, стр. 78—79.

жидкое состояние, и тела могут подразделяться сколь угодно...».

Идеи абсолютного атомизма были неприемлемы для Лейбница потому, что они, во-первых, не давали объяснения основным видам взаимодействия — если говорить о физике, то в первую очередь всемирному тяготению — и, во-вторых, не могли объяснить целостности тел, присущей им внутренней «согласованности», которая особенно бросается в глаза у живых существ, но проявляется, в сущности, в любых системах — в солнечной системе, в кристалле, в круговоротах вещества на Земле. Картезианская же картина материи, сводившая все свойства тел к протяженности и виду движения (перемещения) образующих их корпускул, вообще не могла справиться с проблемой устойчивости тела; картезианцы (даже грубо приближенно) не могли объяснить прочность тел. Поэтому динамические воззрения, основанные на понятии силы, каким-то образом связанной с каждой частицей материи, все больше проникали в физику и естествознание вообще.

Правда, представления об активности у Лейбница имели идеалистический характер. Но как бы то ни было, именно в активности, деятельности Лейбниц усматривает неотъемлемый атрибут вещей; в физическом мире активность проявляется не только в притяжении и отталкивании, но и в сохранении движения.)

Вторым основным принципом лейбницевой картины мира была идея гармонии, согласованности различных объектов и явлений в мире. У Лейбница гармония имеет смысл предустановленной целесообразности, т. е. носит телеологический характер. Однако другой формы идеи согласованности, целостности материальных систем в то время вообще не существовало в философии. Атомисты сводили образование сложных систем к игре случая или удовлетворялись рассуждениями о стремлении «подобного к подобному». Ньютон усматривал причину образования солнечной системы в «начальном толчке», данном творцом мира телам системы. Наука той эпохи не располагала никакими данными, которые дали бы возможность рационального истолкования «механизма» единства и целостности материальных объектов.

Таким образом, концепция пространства и времени, развитая Лейбницем, находилась в соответствии с его пониманием активности как важнейшего свойства объектов, с пониманием тела как части мира, приобретающей свои свойства (в том числе и протяженность) лишь во взаимодействии с другими телами.

В этой картине мира не могло быть места для особых начал, существующих наряду с материей, — для абсолютного пространства и абсолютного времени.

3. Лейбницева концепция пространства и времени не оказывала почти никакого влияния на развитие физики в течение двух веков. Чем объясняется непризнание лейбницевой концепции со стороны подавляющего большинства естествоиспытателей?

Это объясняется теми же причинами, которые обусловили принятие ньютоновой концепции.

Во-первых, воззрения Лейбница на пространство казались противоречащими факту существования вакуума. Вакуум не препятствует движению тел, например планет или комет, энергия которых при движении в мировом пространстве практически не рассеивается. Если существование пустоты отвергается, то требуется найти какое-либо другое объяснение факту абсолютной «податливости» вакуума.

Лейбниц признавал существование эфира и искал в его свойствах ответ на вопрос об абсолютной проницаемости вакуума. Но основанная на концепции эфира вихревая теория движения небесных тел, предложенная Декартом, оказалась не в состоянии объяснить законы Кеплера и была отвергнута. Представление же об эфире как о весьма разреженном и упругом газе, которого придерживались Гюйгенс, Эйлер, Ломоносов, Бернулли и другие, предполагает существование пустоты, разделяющей частицы эфира. И хотя Лейбниц подверг резкой критике ньютоново представление о тяготении как о силе, связанной с каждой частицей материи и мгновенно действующей на расстоянии, и объявил его мистическим, но сам он никакого рационального истолкования тяготения не мог предложить. Интересно, что в качестве одного из доводов против абсолютного вакуума Лейбниц выдвигал факт постоянства скорости света, идущего к Земле от мировых тел.

Однако этот довод не был принят во внимание. Во всяком случае концепции Лейбница не удалось преодолеть трудности с вакуумом. Только после открытия поля проблема вакуума предстала в новом свете.

Во-вторых, концепция Лейбница казалась непримиримой с представлениями классической механики. В ней нельзя было найти объяснения преимущественной роли инерциальных систем отсчета. В самом деле, если движение тела может рассматриваться только как относительное, то почему же законы механики верны только в инерциальных системах отсчета, а не в любых? И каков критерий инерциальности системы с этой точки зрения?

Лейбниц пытался найти выход из этой трудности, проведя грань между понятиями движения в кинематическом смысле и в динамическом смысле. По Лейбницу, кинематически движение является только относительным; в динамике же существует различие между реальным движением данного тела и только относительным. «Истинно» движущемуся телу Лейбниц приписывает состояние особой активности, способности к действию, пропорциональной его живой силе. Именно исходя из такого представления о сохранении способности к действию движущегося тела, Лейбниц сформулировал впервые закон сохранения живых сил для тела в поле тяжести. Однако при этом снова вставал первоначальный вопрос: либо скорость отдельного тела самого по себе, безотносительно к другим телам, вообще не имеет смысла — в таком случае непонятно, в какой системе отсчета следует рассматривать «активное» движение данного тела; либо активное движение тела самого по себе чем-то отличается от его относительного движения («кинематического»), и тогда мы приходим к признанию преимущественной системы отсчета и должны указать критерий такой системы, ее отличие от любой другой системы отсчета. На внутреннюю противоречивость этого противопоставления кинематического и динамического аспектов движения указывал Гюйгенс. Лейбниц не сумел справиться с этим противоречием. Его рассуждения о том, что мы можем себе всегда «представить» инерциальную систему, были неубедительны. Поэтому его концепция пространства и времени представлялась неудовлетворительной с точки зрения классической механики. Именно

по этой причине Эйлер и другие мыслители того времени, отвергавшие ньютонову картину дальнего действия, были вынуждены примкнуть к его концепции пространства и времени.

В-третьих, лейбницева концепция казалась не соответствующей общепринятому тогда мнению о единственности и универсальности евклидовой геометрии. Сам Лейбниц, будучи рационалистом в теории познания, рассматривал аксиомы геометрии как логически самоочевидные. Поэтому, казалось бы, идея о единственности геометрий может быть совмещена и с его концепцией пространства, а не только с ньютоновой, в которой утверждение о единственности и универсальности евклидовой геометрии представлялось как следствие абсолютности пространства. Но в лейбницевой концепции пространственные отношения рассматриваются как производные от отношений взаимодействия тел. Поэтому, если принять, что взаимодействия тел могут иметь различную природу, то можно прийти к выводу о возможности пространственных отношений иного типа, чем евклидовы. Как указывает Куно Фишер, у Лейбница имеется высказывание (правда, весьма общего характера) о возможности разных геометрий. Между тем и естествоиспытатели, и математики, и философы 18 века придерживались мнения, что геометрию Евклида следует считать универсальной, соответствующей реальным пространственным отношениям мира.

Таковы причины, обусловившие отрицательное отношение большинства естествоиспытателей 17—18 веков к концепции Лейбница. Вместе с тем важно отметить, что неудовлетворительность лейбницевой концепции пространства и времени с точки зрения классической механики и геометрии тесно связана с ее внутренними слабостями.

Определение пространства и времени соответственно как порядка сосуществующих тел и порядка явлений недостаточно потому, что в нем не содержатся такие характеристики этих форм бытия, как протяженность и длительность. На это слабое место лейбницевой концепции и указал Кларк. А между тем именно протяженность и длительность являются основой метрических свойств пространства и времени — определенных величин расстояний и промежут-

ков времени между событиями. Метрические же свойства исключительно важны потому, что количественные закономерности природы выражаются через зависимости физических величин от расстояний и времени.

Лейбниц пытался устранить этот недостаток своего определения пространства и времени указанием на то, что «порядок» в его понимании включает также соответственно протяженность и длительность. Более того, он подчеркивает, что порядок «делает возможным какое-либо расположение тел...». Этим он стремится показать, что пространство сохраняется и в том случае, когда расположение данных тел нарушается. Но что именно делает возможным «то или иное» расположение тел? Ньютон дает на этот вопрос ясный (для того времени) ответ: такая возможность создается наличием идеально твердого «каркаса», реального пустого пространства, сохраняющего свои метрические свойства независимо от своего наполнения. Ответ Лейбница о существовании «фиксированных состояний» материи, служащих базисом пространства, не был понят в то время. Таким образом, одностороннее подчеркивание Лейбницем «порядка» как главной характеристики пространства и времени оказывалось несовместимым с идеей о неизменности метрических свойств пространства и времени, которые в то время рассматривались как универсальные и абсолютные.

В связи с этим в литературе встречается утверждение, что лейбницева концепция была чисто спекулятивной, между тем как ньютонова была основана на данных физики, астрономии и геометрии. С таким утверждением нельзя согласиться. Воззрения Лейбница на пространство и время действительно приводили к указанным выше трудностям. Но они соответствовали определенной картине природы, основанной на признании активности материи, целостности материальных тел и систем, удивительной «согласованности» совершающихся в них процессов. Теоретический анализ этих фактов был не под силу классической физике (и тем более механике), эти факты не объясняла и ньютонова картина природы. Дальнейшее развитие физики, астрономии и геометрии в 19 и 20 веках показало, что ньютонова концепция пространства и времени, в свою очередь, оказалась не в состоянии преодолеть трудности,

которые встали на ее пути при выходе за рамки сравнительно узкого круга проблем, успешно разрешавшихся на основе классической механики и евклидовой геометрии.

Поэтому не удивительно, что философия, которую всегда интересовала картина природы в целом, не отказалась от лейбницевой концепции. В философии наметились несколько иные тенденции, чем в естествознании 18 и начала 19 веков.

§ 3. Понятия пространства и времени в философии 18—19 веков

1. Ньютонова концепция получила почти всеобщее признание в физике и астрономии в 18 веке и первой половине 19 века. Однако развитие ньютоновой физической картины мира уже в 18 веке выявило внутренние противоречия, заложенные в ней.

Суть противоречий заключалась, прежде всего, в том, что господствовавшее в то время физическое представление о взаимодействиях тел как осуществляемых посредством «вложенных» в тела сил, влияние которых передается от одного тела к другому, не согласовывалось со взглядом на протяженность как на первичное, неизменное свойство тела, — взглядом, которого придерживались тогда и многие противники динамизма Ньютона (Гюйгенс, Эйлер и другие). В самом деле, рассмотрим, что произошло бы при столкновении двух частиц с неизменным объемом. Такой удар (согласно представлениям Гюйгенса) должен быть идеально упругим, в противном случае энергия (в терминологии того времени — живая сила движения) безвозвратно теряется. Но при упругом ударе частиц, обладающих неизменным объемом, происходит мгновенное изменение их количеств движения на конечную величину, т. е. сила их упругого взаимодействия должна быть бесконечной. Таким образом, признание протяженности частицы первичным, неизменным ее свойством приводит к бесконечным силам, действующим между частицами конечной массы. Выходит, что в природе имеется два класса сил: обычные силы (тяготения, электрические), являющиеся конечными, и бесконечные силы, обусловленные протяженностью. Такое представление было явно неудовле-

творительным¹⁾. Поэтому у некоторых исследователей того времени возникало стремление свести непроницаемость (протяженность) частиц к действию отталкивающей силы, быстро возрастающей с уменьшением расстояния между сталкивающимися частицами. Но в таком случае «прикосновение» частиц теряет чисто геометрический смысл и протяженность частицы оказывается не первичным свойством, а производным от сил отталкивания. Сама же частица оказывается лишь центром действия сил отталкивания и притяжения.

Во-вторых, представлялся странным и сам факт зависимости силы от расстояния. Поскольку с точки зрения дальнего действия пустота не является препятствием для действия силы и не играет никакой роли в ее передаче от тела к телу, кажется необъяснимым, что все силы так или иначе зависят от расстояния. Это обстоятельство считалось противниками ньютоновой физики мистикой, противоречащей здравому смыслу. Одно из двух: либо требовалось объяснить, например, ослабление силы тяготения пропорционально квадрату расстояния влиянием среды (эфира), служащей передатчиком силы, либо нужно было признать само расстояние существенным фактором силы. В последнем случае пространство теряет свою независимость от материи.

Наконец, оставалась загадочной и сама связь силы и материи. Многообразие сил, действующих в природе (тяготения, электрические, магнитные и другие), и их кажущаяся независимость порождали представление о наличии многих независимых «материй». Наряду с обычной весомой материей в естествознании появились «невесомые субстанции», каждая из которых была носителем «своей» силы. Сочетание же в одном теле многих несвязанных «субстанций», естественно, приводило к противоречиям и прямым несуразностям.

Таким образом, физическая картина мира, созданная Ньютоном и его последователями, включавшая, с одной стороны, представление о протяженности как первичном свойстве (атрибуте) материи, а с другой — представление

¹⁾ ср. K. L a s s w i t z, Geschichte der Atomistik, Bd. II, Leipzig, 1926.

о далекодействующих силах, как-то связанных с материей, была глубоко противоречивой. Это означало, что ньютонова физическая картина мира в целом (а следовательно, и его концепция пространства и времени, составлявшая неотъемлемую часть этой картины мира) была неудовлетворительной. И хотя в физике эти противоречия, как правило, игнорировались, поскольку пути их устранения в 18 веке были еще неясны, философия не могла их обойти. В дальнейшем мы рассмотрим трактовку понятий пространства и времени как в материалистической, так и в классической немецкой идеалистической философии. Но сначала мы остановимся на попытке устранить трудности проблемы пространства и времени путем субъективистской их трактовки.

2. Впервые субъективно-идеалистические воззрения на пространство и время были развиты Беркли. В отличие от Локка, подразделявшего все свойства материальных вещей на первичные (размер, форму, вес), объективно присущие самим вещам, и на вторичные (цвет, запах и т. п.), являющиеся лишь субъективной формой восприятия вещей, Беркли объявляет субъективными все свойства тел. Расстояния между телами, утверждал он, а также их размеры оцениваются зрением и осязанием и, следовательно, также субъективны. То же можно сказать и о длительности процессов.

С этой точки зрения Беркли критиковал ньютонову концепцию пространства и времени. Он отвергает абсолютные пространство и время, объявляя их фикциями, поскольку они непознаваемы чувствами. В соответствии с этим он рассматривает движение только как относительное перемещение. То обстоятельство, что законы Ньютона верны только в инерциальных системах отсчета, а не в любых, Беркли игнорирует.

Здесь можно ограничиться этими замечаниями о взглядах Беркли, так как в ту эпоху они не имели никакого влияния в науке. Это было вполне естественно, поскольку Беркли попросту игнорировал результаты механики, физики, астрономии и геометрии. Все его рассуждения основаны только на примитивных, ненаучных, чисто внешних наблюдениях. Идеи Беркли приобрели некоторое влияние в конце 19 века; к этому вопросу мы вернемся в дальнейшем.

Иначе обстояло дело с воззрениями Канта, игравшими значительную роль в естествознании 19 века. Кант первоначально придерживался взглядов Лейбница на пространство и время. Протяженность тела, по Канту, определяется равновесием сил притяжения и отталкивания: силы притяжения связывают части тела, силы отталкивания определяют его непроницаемость и соответственно размер. В одной из своих первых работ («Мысли об истинной мере живых сил») Кант писал, что «не было бы ни пространства, ни протяжения, если бы субстанции не обладали силой действовать вне себя; без силы нет связи, без связи нет порядка, вне порядка, наконец, нет пространства».

Следует подчеркнуть, что Кант, в отличие от Лейбница, рассматривал частицы субстанции не как духовные индивидуумы, наделенные способностью восприятия, а как физические центры сил притяжения и отталкивания.

Однако противоречия между концепцией Лейбница и классической механикой, а также евклидовой геометрией поколебали взгляды Канта и склонили его к противоположной, ньютоновой концепции. Перед ним встал вопрос: как объяснить «внеопытность» и фактическую непознаваемость ньютонова абсолютного пространства и времени? С другой стороны, и евклидова геометрия представлялась Канту абсолютно достоверной. Ее аксиомы, в отличие от положений физики или механики, постигаемых при помощи опыта, казались самоочевидными. Абсолютная достоверность евклидовой геометрии признавалась также и другими мыслителями (в частности, Юмом).

Разрешение всех этих противоречий Кант усмотрел в утверждении, что пространство и время постигаются не путем опыта, а интуитивно, что они являются априорными формами человеческого созерцания, предшествующими всякому опыту. Канту казалось, что этим путем разрешаются все трудности проблемы пространства и времени. Становится понятной самоочевидность аксиом геометрии, равно как и сама идея об абсолютности пространства и времени; ибо пространство и время, будучи априорными формами созерцания, могут быть только универсальными формами; можно говорить только о «единственном пространстве». Правда, опыт нам дает только относительные

пространство и время, относительные расстояния и продолжительности; но их законы (геометрия пространства и исчисление времени), по мнению Канта, абсолютны и внеопытны, и следовательно, универсальны.

Кант пытался подкрепить свои утверждения об априорности пространства и времени доказательством того, что свойства пространства противоречат определению его как «порядка вещей». В самом деле, порядок (т. е. относительное расположение) вещей может быть одинаковым и вместе с тем различаться в зависимости от правого или левого направления. Невозможно вообще совместить путем перемещения тела, являющиеся зеркальными отображениями друг по отношению к другу (например, правую и левую руки). Следовательно, утверждает Кант, понятие направления в пространстве не охватывается понятием «порядка». Это доказывает, по мнению Канта, специфичность пространства, его несводимость к «порядку» тел.

Нетрудно убедиться в том, что рассуждения Канта о симметрии пространства ошибочны; мы рассмотрим их подробнее в главе IV.

Таким образом, Кант, принимая субъективистский взгляд на природу пространства и времени, вместе с тем объявляет «вечными и неизменными» как евклидову геометрию, так и механику Ньютона, основанную на признании неизменности (инвариантности) расстояния между двумя точками (в данный момент) и промежутка времени между моментами каких-либо двух событий в любой системе отсчета. Априоризм отрывает также геометрию от физики, поскольку последняя признается основанной на опыте. Эти утверждения Канта были опровергнуты открытием неевклидовой геометрии и доказательством ее соответствия действительным пространственным отношениям.

Воззрения Канта на пространство и время были составной частью его гносеологии в целом. Как известно, Кант считал непознаваемой и сущность вещей самих по себе, и природу сил, действующих между телами. Это была глубоко консервативная философская система, абсолютизировавшая результаты науки той эпохи и лишавшая ее перспективы — познать действительную сущность явлений природы. Воззрения Канта нашли значительное количество последователей среди естествоиспытателей, особен-

но в первой половине 19 века, и сыграли тормозящую роль в развитии науки. Прогрессивная философия пошла по другому пути.

3. Основным принципом передовой материалистической философии 18 и 19 веков было признание активности главным свойством материи, неотъемлемым атрибутом всего существующего. Основное различие между более ранними философскими школами этого направления и диалектическим материализмом в данном вопросе состоит в различном понимании самой активности. Виднейшие философы-материалисты 18 века — Толанд, французские материалисты (Дидро, Гольбах) — сводили активность материи к стремлению механически действовать на другие объекты, изменять состояние механического движения других тел (или частиц материи). Диалектический же материализм понимает активность как самодвижение материи, проявляющееся в многообразных качественно различных формах. Поскольку материалисты рассматривали активность, способность к действию как атрибут любого объекта, они отвергали ньютонову концепцию абсолютного пустого пространства и абсолютного пустого времени как особых начал, объективно существующих, но неспособных действовать и испытывать влияние. Толанд писал: «Понятие пустоты есть одно из бесчисленных ошибочных следствий из определения материи через одно лишь протяжение, из утверждения, что материя по своей природе бездеятельна, из мысли, что она разделена на реальные части, вполне независимые друг от друга»¹⁾. Так же рассуждал и Дидро.

Однако, отвергая ньютонову концепцию пространства и времени, материалисты 18 века вместе с тем считали протяженность изначальным и неизменным свойством материальных частиц, присущим им наряду с активностью. Толанд полагал, что протяженность тел является условием их делимости и присуща им наряду с другими атрибутами — непроницаемостью и инертностью.

Такое понимание пространства и времени, как мы выяснили выше, включает в себе логическое противоречие.

¹⁾ Д. Т о л а н д, Письма к Серене. Письмо пятое, Избр. соч., М. — Л., Госиздат, 1927, стр. 100.

Если протяженность частицы не зависит от ее взаимодействий, то либо частица есть абсолютно твердое тело и, следовательно, может двигаться только в пустоте, либо же мы предполагаем, что материя делима до бесконечности, и тогда мы возвращаемся к понятию эфира Декарта со всеми вытекающими из этого понятия неодолимыми трудностями, вскрытыми еще Ньютоном. Остается принять, что размер частиц изменяется в зависимости от их взаимодействий; но в таком случае протяженность не неизменное свойство, присущее материи наряду с активностью, а функция этой активности, форма ее проявления.

К такому выводу и пришел выдающийся мыслитель 18 века Бошкович. Он рассматривает материю как состоящую из частиц — силовых центров. Силы, действующие между «элементарными» частицами и связывающие их в более сложные образования, изменяются с расстоянием по различным законам; многообразные силы, действующие в природе, представляют собой различные виды единой силы.

В этой динамической картине материи отдельная частица есть материальная точка, не имеющая конечного протяжения, так же как и монады Лейбница. Но активность частиц понимается Бошковичем не в объективно-идеалистическом смысле, как у Лейбница, а материалистически, как физическая сила, связывающая данную частицу с другими. Понятие протяженности, по Бошковичу, применимо лишь ко многим частицам, по крайней мере к двум.

По свидетельству В. Гента¹⁾, Бошкович впервые высказал предположение, что размер тела, т. е. расстояние между образующими его частицами, изменяется в зависимости от движения тела.

Таким образом, признание активности материи в качестве ее атрибута с необходимостью приводило философов к взглядам на пространство и время, близким к концепции Лейбница. Но при этом оставались неразрешенными те трудности, о которых было сказано выше (в § 2 этой главы): существование вакуума (которое не представляло затруднений только для Бошковича) и несоответствие

¹⁾ W. G e n t, Die Philosophie des Raumes und der Zeit, Berlin, 1926.

с фактом наличия «привилегированных» инерциальных систем отсчета в классической механике. Философия того времени игнорировала эти трудности.

Концепция Ньютона была отвергнута не только выдающимися философами-материалистами 18 и начала 19 веков, но и представителями классической идеалистической философии. Мы здесь рассмотрим воззрения Гегеля на пространство и время.

4. В своей «Философии природы» Гегель подвергает критике как субъективистское понимание времени и пространства, так и ньютоновы представления о них. Он пишет: «Время не есть как бы ящик, в котором все помещено, как в потоке, увлекающем с собою в своем течении и поглощающем все, попадающее в него. Время есть лишь абстракция поглощения»¹⁾. «Мы не можем обнаружить никакого пространства, которое было бы самостоятельным пространством; оно есть всегда наполненное пространство, и нигде оно не отлично от своего наполнения»²⁾.

Но, отвергая концепцию Ньютона, Гегель не принимает полностью определения пространства и времени, данные Лейбницем. Он пишет: «Если же говорят, подобно Лейбницу, что пространство является порядком вещей и что оно имеет своих носителей в вещах, то мы сразу же убедимся, что, если мысленно отбрасываем вещи, наполняющие пространство, все же остаются пространственные отношения и независимо от вещей».

Говоря о «пространственных отношениях независимо от вещей», Гегель отнюдь не возвращается к Ньютону. Он подчеркивает специфичность пространства как общей формы бытия, которую он отличает от протяженности единичной вещи. Пространство не совпадает с протяженностью отдельной вещи, так как ему присущи свои отношения и закономерности, изучаемые геометрией. То же относится и ко времени, хотя, как замечает Гегель, «нет науки о времени наряду с наукой о пространстве, с геометрией». Это замечание было верно для той эпохи.

Гегель указывает не только на специфику времени и пространства, но и на их единство. Обе эти формы бытия, по

¹⁾ Г. В. Ф. Гегель, *Философия природы*, М.—Л., 1934, стр. 50.

²⁾ Там же, стр. 44.

Гегелю, являются лишь различными сторонами единства — движения. Только метафизическая рассудочность отрывает эти две формы бытия друг от друга, делает их независимыми. «В представлении пространство и время совершенно отделены друг от друга, в представлении нам кажется, что существует пространство и, кроме того, также и время. Против этого «также» восстает философия»¹⁾. В этом вопросе — о единстве пространства и времени — Гегель опередил современное ему естествознание.

Однако абсолютный идеализм Гегеля сказался на его анализе пространства и времени. Верный своему методу — «конструированию» действительности путем перехода от более абстрактного к более конкретному, — он начинает анализ с предельных абстракций, с пространства и времени самих по себе, и уже затем чисто умозрительным путем ищет их единства — движущейся материи, которая, таким образом, сводится Гегелем к простому единству этих форм. При этом неизбежно теряется мысль, что пространственные и временные отношения и закономерности должны зависеть от общих законов взаимодействия материальных объектов. В этом отношении гегелевский анализ пространства и времени значительно слабее, чем у Лейбница. Абсолютный идеализм привел Гегеля и к ошибочному заключению, что пространственные и временные отношения существенны лишь для явлений природы, но несущественны ни для ее основных закономерностей (для «сущности»), ни, тем более, для сферы сознания («духа»).

Таковы взгляды Гегеля на пространство и время.

Таким образом, прогрессивная философия 18 и первой половины 19 веков придерживалась воззрений на пространство и время, стоявших ближе к концепции Лейбница, чем к концепции Ньютона. В философии Толанда, Дидро, Гегеля пространство и время рассматриваются как общие формы бытия, неотделимые от их содержания — от реально существующих объектов и процессов. Таков был идейный философский фон, способствовавший появлению в науке одного из важнейших революционных творений теоретической мысли — неевклидовой геометрии.

¹⁾ Г. В. Ф. Гегель, *Философия природы*, М.—Л., 1934, стр. 49.

§ 4. Представления о пространстве в неевклидовой геометрии

1. Один из основных доводов в пользу ньютоновой концепции пространства и времени — наличие только одной-единственной геометрии (евклидовой) и, как следствие, вывод о ее универсальном характере — был устранен в первой половине 19 века в результате создания неевклидовой геометрии. Важнейшую роль в разработке основ новой геометрии сыграли Н. И. Лобачевский, а затем Б. Риман.

Лобачевский взялся за труд, казавшийся почти всем математикам его времени лишенным смысла, — отыскать последовательную систему закономерностей пространства, коренным образом отличающуюся от закономерностей, систематизированных Евклидом. Однако он не был единственным. Аналогичный труд предпринял Я. Больяи; идеи Лобачевского были близки и Гауссу. Уже самый факт возникновения в один и тот же период времени у нескольких исследователей, независимо друг от друга, мысли о возможности существования геометрии, отличной от евклидовой, свидетельствует о наличии причины, вызвавшей к жизни эту мысль. Такой причиной, на наш взгляд, явилось окрепшее к тому времени убеждение в правильности динамической концепции материи. Мысль об активности самой материи, проявляющейся в различных формах и прежде всего в том, что материальные системы могут спонтанно возникать и исчезать, все шире проникала в науку.

«Первую брешь», по выражению Энгельса, в ньютоновой метафизической картине мира пробила канто-лапласовская космогоническая гипотеза. Мировые тела и системы стали рассматриваться не как существующие от века, а как формирующиеся в результате сгущения туманностей, ранее заполнявших обширные пространства. Следовательно, мировые тела возникают из окружающей их материальной среды в результате внутренних закономерностей движения самой материи. Такое представление о телах, как мы увидим, оказалось весьма важным для развития геометрических идей.

Подверглась серьезным испытаниям и физическая картина мира, созданная последователями Ньютона. Во-первых, было доказано, что «невесомые» субстанции, в частности магнитная жидкость, которая считалась носителем магнитных действий, на самом деле не существуют. Магнетизм был сведен к взаимодействиям электрических токов. Правда, по форме взаимодействие токов напоминает обычные ньютоновы взаимодействия частиц: элементарные токи притягиваются (или отталкиваются) пропорционально интенсивностям и обратно пропорционально квадрату расстояния; однако само наличие силы, присущей токам, не укладывалось в рамки обычной ньютоновой схемы, в которой силы трактовались как извечные и неизменные самостоятельные начала, «присутствующие» в материальных частицах.

Еще более чувствительный удар по ньютоновой картине мира был нанесен волновой теорией света. Распространение световых волн через вакуум с постоянной скоростью вступило в логическое противоречие с самой идеей пустоты. А поперечный характер световых волн не допускал представления о заполнении мировой пустоты газовым эфиром (в газе поперечные волны не могут распространяться). И хотя попытки разработать модель эфира, сплошь заполняющего мировое пространство, свойства которого объясняли бы возможность передачи световых волн, явно не удавались, представление о дальнодействии через пустое пространство было сильно поколеблено.

Идея о материальном единстве мира, о том, что различные виды физических явлений представляют собой различные формы единой «силы», присущей материи, все глубже внедрялась в сознание исследователей. Эта идея составляет основное содержание прогрессивной науки той эпохи. Таков был научный фон, на котором возникла неевклидова геометрия.

2. Исходным положением, из которого выросла геометрия Лобачевского, было признание логической недоказуемости пятого постулата Евклида. Согласно этому постулату, через данную точку может проходить только одна прямая, параллельная данной. До Лобачевского предпринимались неоднократные попытки вывести пятый постулат из других аксиом Евклида, поскольку этот по-

стуллат представлялся недостаточно наглядным (он относится к бесконечной линии в целом, а не к отрезку) и как бы изолированным от остальных постулатов. Однако все эти попытки кончались неудачей — вместо пятого постулата вводилось какое-либо другое, столь же недоказуемое и стоящее особняком положение (например, о существовании подобных треугольников, о равенстве суммы углов треугольника двум прямым и т. д.). Более того, попытки ввести вместо пятого постулата противоположное утверждение в качестве аксиомы геометрии отнюдь не приводили к логическим противоречиям, но лишь к результатам, которые казались тогда абсурдными. Так, например, Саккери в 1733 г., основываясь на противоположной аксиоме, вывел 32 теоремы геометрии Лобачевского (в частности, что сумма углов треугольника меньше двух прямых), но остался при убеждении, что эти теоремы лишены реального смысла.

Историческая заслуга Лобачевского состояла в том, что он совершенно по-другому отнесся к выведенной им системе положений, основанных на принятии постулата, противоположного пятому постулату Евклида, а именно что через данную точку может проходить не одна прямая, параллельная данной прямой. Лобачевский высказал предположение, что неевклидова геометрия, названная им из осторожности «воображаемой», может оказаться соответствующей опыту, т. е. объективным свойствам пространства. Этот взгляд на неевклидову геометрию вытекал из всего мировоззрения Лобачевского и прежде всего из его концепции пространства.

Лобачевский отвергал ставшую тогда почти общепризнанной догмой ньютонову концепцию пространства и времени. С точки зрения Лобачевского, пространство не есть реальность, существующая наряду с материей и независимо от нее, а форма существования тел. Он писал: «Между свойствами, общими всем телам, одно должно называться Геометрическим — прикосновение. Словами нельзя передать совершенно того, что мы под этим разумеем: понятие приобретено чувствами, преимущественно зрением, и сими-то чувствами мы его постигаем. Прикосновение составляет отличительное свойство тел: ни в силах или времени и нигде в природе более его не находим.

Отвлекая все прочие свойства, телу дают название Геометрического.

Прикосновение соединяет два тела в одно. Так все тела представляем частью одного — пространства»¹⁾. Таким образом, понятие пространства включает общее свойство бесконечного множества сосуществующих тел определенным образом ограничивать друг друга и вместе с тем продолжать друг друга. Протяжение есть свойство тел быть разделяемыми «поступательными сечениями».

Мы видим, что Лобачевский был ближе к концепции пространства, развитой Лейбницем. В своих лекциях по механике он рассматривает и время не как особое начало, а как общую меру движений. Таким образом, по Лобачевскому, геометрические свойства тел являются наиболее общими физическими свойствами; как таковые, они определяются общей природой сил, формирующих тела. Мысль эта очень важна, и мы изложим ее словами самого Лобачевского:

«В природе мы познаем собственно только движение, без которого чувственные впечатления невозможны. Итак, все прочие понятия, например Геометрические, произведены нашим умом искусственно, будучи взяты в свойствах движения; а потому пространство, само собой, отдельно для нас не существует. После чего в нашем уме не может быть никакого противоречия, когда мы допускаем, что некоторые силы в природе следуют одной, другие своей особой Геометрии ... Но в том однакож нельзя сомневаться, что силы всё производят одни: движение, скорость, время, массу, даже расстояния и углы ... Но когда верно, что силы зависят от расстояния, то линии могут быть также в зависимости с углами. По крайней мере, разнородность одинакова в обоих случаях, которых различие не заключается собственно в понятии, но только в том, что мы познаем одну зависимость из опытов, а другую при недостатке наблюдений должны предполагать умственно либо за пределами видимого мира, либо в тесной сфере молекулярных притяжений»²⁾.

¹⁾ Н. И. Лобачевский, Полное собрание сочинений, т. II, Гостехиздат, 1949, стр. 187.

²⁾ Там же, стр. 158—160.

Следовательно, в соответствии с различным характером действия того или иного класса сил возможны различные закономерности пространства и соответственно различные геометрии.

Эта мысль исключительно важна. Различные геометрии, с точки зрения Лобачевского, не являются независимыми друг от друга: одна из них является более общей,

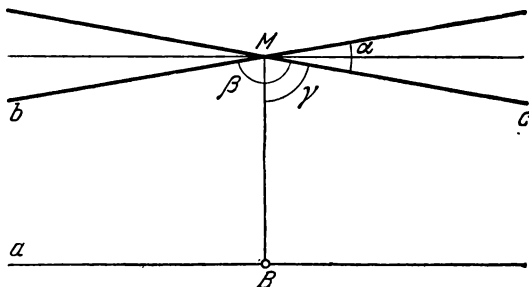


Рис. 2. К постулату Лобачевского.

другая представляет частный случай первой. Решить вопрос о том, какая геометрия верна, т. е. соответствует действительным закономерностям пространства данного типа, может только опыт. Поэтому и вопрос о параллельных, как общий вопрос, касающийся закономерностей пространства, может быть решен не чисто логически, а лишь на основании опыта, наблюдений. Лобачевский пытался проверить, не оправдывается ли новая геометрия в астрономических областях пространства, но пришел к заключению, что астрономические данные подтверждают евклидову геометрию. Теперь мы знаем, что анализ движения планет вокруг Солнца приводит к иному заключению, а именно о справедливости в космических областях пространства неевклидовой геометрии.

Обратимся теперь к рассмотрению некоторых важнейших положений геометрии Лобачевского.

Лобачевский начинает с предположения (постулата), что к данной прямой a через данную точку M можно провести две прямые b и c так, что они не пересекают прямую a (рис. 2). Очевидно, что любая прямая, расположенная в угле α между этими прямыми, также не будет пересекать

прямую a ; секущими по отношению к ней будут все прямые, расположенные между b и c в угле β . Предельные прямые b и c Лобачевский называет параллельными a . Угол γ , равный половине угла β , он называет углом параллельности. Очевидно, что этот угол меньше прямого.

Можно также доказать, что расстояние между двумя параллельными прямыми в геометрии Лобачевского не постоянно, а в одном направлении асимптотически уменьшается, в другом — растет до бесконечности. Линия, проходящая на постоянном расстоянии от данной прямой, в действительности не прямая, а кривая; Лобачевский называет ее эквидистантой.

Существенно то обстоятельство, что угол параллельности также не остается постоянным, а меняется в зависимости от расстояния точки, через которую проводится параллельная, от данной прямой a . Чем дальше точка M от a , тем меньше угол параллельности. В пределе, при удалении точки M от прямой a на бесконечность, угол параллельности стремится к нулю.

Из учения Лобачевского о параллельных вытекают интересные следствия о свойствах треугольника и окружности. Именно, сумма углов треугольника всегда меньше двух прямых, причем по мере увеличения треугольника она стремится к нулю. Следовательно, не существует треугольников сколь угодно большой площади. Евклидовы положения о подобии и равенстве треугольников оказываются в общем случае неприменимыми: два треугольника равны, если равны их углы; следовательно, в геометрии Лобачевского существует однозначная зависимость между углами и сторонами треугольника (а не между отношениями сторон, как в геометрии Евклида). Только в пределе, для весьма малых треугольников, справедлива геометрия Евклида.

Иными являются и соотношения для окружности. Длина окружности l не равна $2\pi r$, а с увеличением радиуса возрастает по показательному закону $l = \pi k(e^{r/k} - e^{-r/k})$; k — постоянная, имеющая весьма существенное значение. Именно в пределе, для окружностей сравнительно малого радиуса (когда r/k достаточно мало), евклидово соотношение $l = 2\pi r$ применимо с достаточной точностью. Таким образом, в пределе (при r/k весьма малых) геомет-

рия Лобачевского переходит в геометрию Евклида. Отсюда можно сделать заключение, что высокая точность евклидовой геометрии в обычной практике свидетельствует о том, что постоянная k , входящая в формулы геометрии Лобачевского, должна быть очень велика. Геометрия Лобачевского может оказаться применимой в космических пространствах (при r , сравнимых с k).

3. Необычность пространственных отношений в геометрии Лобачевского и отсутствие реальных геометрических образов, обладающих указанными Лобачевским свойствами, обусловили отношение к геометрии Лобачевского со стороны математиков первой половины 19 века как к системе произвольных положений, ничего общего не имеющих с действительностью. Это отношение изменилось, когда Бельтрами в 1868 г. нашел двухмерный образ новой геометрии. Бельтрами показал, что геометрия на ограниченной части «плоскости» Лобачевского совпадает с внутренней геометрией определенной поверхности, так называемой псевдосферы, т. е. с геометрическими соотношениями на самой поверхности (подробнее см. ниже).

Псевдосфера может быть получена вращением некоторой кривой, трактрисы (см. рис. 3, а), вокруг ее асимптоты. Выяснилось, что прямые Лобачевского есть не что иное, как кратчайшие (геодезические) линии на псевдосфере (рис. 3, б). Если перемещать по этой поверхности какую-либо фигуру, например треугольник, то он будет изгибаться, но при этом будут сохраняться его углы, отрезки и величина площади.

Разумеется, нельзя было отыскать наглядный образ, соответствующий трехмерному пространству Лобачевского, поскольку практическая геометрия (т. е. реальное пространство) в обычных для нас масштабах является евклидовой. Однако найденный двухмерный образ послужил доказательством того, что геометрия Лобачевского может соответствовать реальным пространственным отношениям.

Еще до появления исследования Бельтрами был опубликован (в 1867 г.) мемуар Б. Римана «О гипотезах, лежащих в основании геометрии», содержащий изложение пробной лекции, прочитанной им в 1854 г. В этом

сочинении был сделан дальнейший шаг по пути развития неевклидовой геометрии.

Исходным пунктом исследования Римана явилась внутренняя геометрия поверхностей, разработанная Гауссом. Чтобы уяснить дальнейшее, необходимо хотя бы коротко сказать о внутренней геометрии поверхностей. Геометрические свойства поверхности можно изучать, задавая ее уравнение в трехмерном пространстве, т. е. рассматривая отношения между точками поверхности,

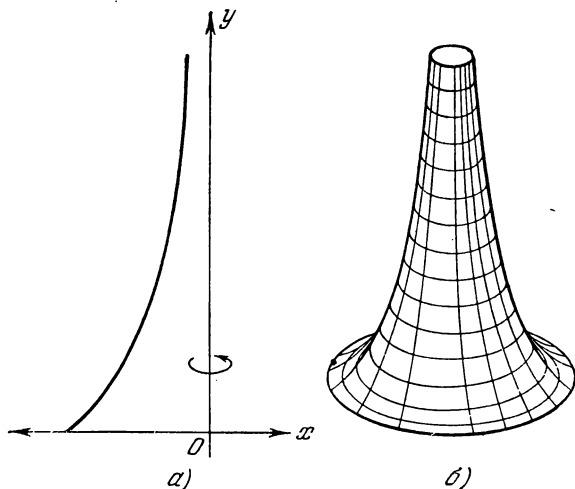


Рис. 3. а) Трактриса; б) псевдосфера.

определенными относительно пространственной системы координат. Но можно отыскивать внутренние свойства самой поверхности безотносительно к ее внешнему положению. Для этого можно пользоваться двумерной системой координат, «оси» которой взяты на самой поверхности. Так, например, можно изучать геометрические свойства сферы, определяя каждую ее точку двумя координатами — широтой и долготой. При этом мы изучаем характерные свойства поверхности, оставаясь на ней самой. Совокупность соотношений, полученных при помощи измерений на самой поверхности и характеризующих ее, и составляет то, что называется внутренней геометрией поверхности.

К этим соотношениям относятся: длина отрезков линий между двумя какими-либо точками, угол между кривыми, площадь какой-либо области, уравнение кратчайшей (геодезической) линии, кривизна поверхности в различных ее точках. Выражение бесконечно малого отрезка линии через разности координат, ограничивающих эту линию точек, дает метрику поверхности. Это выражение в общей форме имеет вид $ds^2 = \sum_{i,k} g_{ik} dx_i dx_k$; $i=k=1, 2$. Здесь

dx_i — дифференциалы координат, ds — длина бесконечно малого расстояния между точками x_i , $x_i + dx_i$ и g_{ik} — коэффициенты, связывающие ds с дифференциалами координат. Эти коэффициенты в общем случае являются переменными, зависящими от координат. Зная эти коэффициенты (т. е. их зависимости от координат), можно определить длину отрезков линий, угол между двумя линиями, наконец, площадь области на поверхности, ограниченной данным контуром. При помощи трех функций от этих коэффициентов можно определить важнейшую инвариантную характеристику поверхности, не изменяющуюся при ее изгибаниях (без растяжений), — ее кривизну в каждой точке. При этом следует подчеркнуть, что понятие кривизны поверхности, пока мы не выходим за ее пределы, отнюдь не является чем-то наглядным. Когда стремятся наглядно определить кривизну поверхности, то в качестве меры кривизны берут меру ее отклонения в данной точке от касательной плоскости; понятие кривизны приобретает наглядность, когда мы рассматриваем поверхность в трехмерном пространстве. Оставаясь же в пределах самой поверхности, можно установить лишь определенные зависимости между ее метрическими коэффициентами g_{ik} и их производными по координатам, которые и определяют то, что называют кривизной, — отклонение от плоскости. На плоскости имеет место евклидова метрика. Кривизна плоскости, зависящая от g_{ik} и их производных, равна нулю. На искривленной же поверхности метрика не является евклидовой; только бесконечно малую область поверхности, если пренебречь бесконечно малыми величинами высших порядков, можно приближенно рассматривать как плоскую.

Теперь мы можем перейти к основным понятиям римановой геометрии.

4. Прежде всего Риман рассматривает пространство произвольного числа измерений. Он называет пространством любое многообразие непрерывно изменяющихся величин, характеризуемых тем или иным «набором» чисел («координатами») и определенным законом измерения расстояний между двумя бесконечно близкими точками. Это обобщенное понятие пространства охватывает не только обычное трехмерное пространство, но и многообразие цветов, звуков, вообще любых физических явлений, которые могут быть определены указанным выше способом. Такое обобщение понятия пространства позволило Риману охватить не только известные в то время из опыта геометрические закономерности, но и исследовать самые различные возможные соотношения пространственных или пространственноподобных величин, которые могут встретиться в дальнейшем.

Основной характеристикой данного риманова пространства является его метрика, т. е. общее выражение расстояния между двумя бесконечно близкими его точками: $ds^2 = \sum_{i,k} g_{ik} dx_i dx_k$, где ds , dx_i , g_{ik} имеют тот же смысл, что и в теории поверхностей. Зная выражение для ds , т. е. совокупность коэффициентов g_{ik} , связывающих ds с дифференциалами координат (так называемый метрический тензор), можно найти длину кривой в этом пространстве, определить характерные для данного типа пространства геодезические кривые (его «прямые»), объем части пространства, наконец, его кривизну. При этом понятие кривизны употребляется в таком же смысле, как и во внутренней геометрии поверхностей: значение кривизны определяет меру отклонения геометрических свойств пространства от евклидова, меру его неевклидовости. Наличие у пространства отличной от нуля кривизны означает, что сумма углов треугольника будет отлична от суммы углов треугольника в обычном евклидовом пространстве или что соотношение между длиной окружности и ее радиусом будет иным, чем в обычном пространстве.

Важное значение имеют пространства постоянной кривизны. В таких пространствах тело может перемещаться без деформации, не изменяя объема и формы. Другими словами, в таком пространстве тело, не подвергающееся

внешним воздействиям, может рассматриваться как *твердое*. Значение этой особенности пространств постоянной кривизны выяснится в дальнейшем (глава III).

Существует три типа пространств постоянной кривизны (все они относятся к так называемым римановым пространствам). Пространством отрицательной кривизны является пространство Лобачевского; о его свойствах уже шла речь. Отрицательный знак кривизны пространства Лобачевского выражается в том, что сумма углов треугольника в нем меньше двух прямых. Кривизна евклидова пространства равна нулю; поэтому его называют плоским. Геометрия пространства положительной кривизны была впервые разработана Риманом (пространство Римана).

В пространстве Римана аксиома о параллельных гласит, что к данной прямой через точку, лежащую вне этой прямой, не проходит ни одна параллельная. Другими словами, все прямые в пространстве Римана пересекаются. Отсюда можно заключить, что пространство Римана конечно. Сумма углов треугольника в этом пространстве больше двух прямых. Длина окружности с возрастанием ее радиуса растет медленнее, чем $2\pi r$. При переходе к достаточно малым областям геометрия пространства Римана все более приближается к геометрии Евклида, которая является ее предельным случаем. Закономерности пространства Римана можно сделать наглядными, рассмотрев метрические соотношения в двух измерениях этого пространства в малой области. Они будут такими же, как и метрические соотношения внутренней геометрии сферы. Большие круги на сфере будут «прямыми» такого пространства (геодезическими); указанные выше свойства треугольника и окружности становятся наглядными при рассмотрении их на сфере.

И здесь возникает естественный вопрос о том, реализуется ли геометрия пространства Римана в действительности. Риман отвечал на этот вопрос в духе Лобачевского, указывая, что вопрос о реальности геометрии может быть решен только опытом. Мы убедимся в дальнейшем, что опыт в больших пространственных масштабах подтвердил реальность пространства Римана.

5. После исследований Лобачевского и Римана вопрос об отношении геометрии к действительности, к опыту,

выступил на передний план. Какие физические свойства тел определяют применимость той или иной геометрии? Каковы физические основы геометрии Евклида, в частности? Эти проблемы привлекли внимание ряда исследователей.

Ответ на последний вопрос был дан Гельмгольцем. В своей работе «О происхождении и значении геометрических аксиом»¹⁾ он указывает, что основой любого доказательства в геометрии является возможность совмещения фигур в результате их перемещения. Но для этого фигура (т. е. тело, рассматриваемое абстрактно, только с точки зрения его размера и формы) должна сохраняться в результате переноса (движения). Следовательно, геометрия основывается на некоторых общих свойствах механического движения *твердых тел*. Таким образом, в основе геометрии лежит понятие твердого тела и его возможных движений. Гельмгольц полагает в основу геометрии ряд постулатов, в том числе допущение о существовании подвижных твердых тел (неизменяемых систем точек), обладающих шестью степенями свободы. Он пишет: «Независимость совместимости от положения и направления совмещающихся пространственных форм и от пути, которым они приведены к совпадению, есть тот факт, на котором основывается возможность измерения пространства»²⁾.

До 19 века в физике принималось, что материальные тела можно рассматривать как идеально твердые при перемещении. Весь имевшийся тогда в распоряжении исследователей опыт не противоречил этому представлению. Физика имела дело только с пространственными закономерностями геометрии Евклида.

Открытие поля в конечном счете привело к отказу от ньютонова понимания пространства, в котором евклидова геометрия считается универсальной. Но это произошло не сразу, а в результате преодоления растущих противоречий, на которые натолкнулось старое учение о пространстве и времени, и поисков пути их разрешения. Эти противоречия выявились во второй половине 19 века.

¹⁾ Н. в. H e l m h o l t z, Schriften zur Erkenntnisstheorie, Berlin, 1921.

²⁾ Г. Г е л ь м г о л ь ц, О фактах, лежащих в основании геометрии, сб. «Об основаниях геометрии», Казань, 1895, стр. 102.

§ 5. Отход от ньютоновой концепции в физике 19 века. Воззрения Маха на пространство и время

1. В середине 19 века было сделано одно из величайших открытий в физике — открытие электромагнитного поля. Понятие о реально существующем электромагнитном поле было впервые создано Фарадеем в результате его исследований передачи электрических и магнитных действий от одного тела к другому.

Основные закономерности электромагнитного поля были установлены Максвеллом; они нашли свое выражение в уравнениях Максвелла. Из этих уравнений получается очень важный вывод: изменения электрического и магнитного полей распространяются от места, где происходит возмущение, с конечной скоростью. Скорость распространения электромагнитных возмущений оказалась равной скорости света. Отсюда Максвелл сделал заключение, которое в менее определенной и не столь обоснованной форме можно найти еще в трудах Фарадея: свет есть переменное электромагнитное поле.

Спустя два десятилетия после опубликования Максвеллом своей теории электромагнитного поля Герц подтвердил на опыте существование электромагнитных волн. Физическая реальность электромагнитного поля была доказана.

Существование электромагнитного поля находится в явном противоречии с ньютоновой концепцией пространства. Факт передачи электромагнитных действий от точки к точке, и притом с постоянной, характерной для вакуума скоростью, показывает, что представление об абсолютной пустоте лишено смысла: пустота, имеющая только размеры и никак не связанная с находящимися в ней частицами, не обладающая вообще никакими физическими свойствами, не может быть «посредником» между частицами материи, «работающим» по строго определенным законам. Поле обладает сходством с пустотой только в одном отношении: оно пронизуемо. Это свойство присуще по крайней мере полям, с которыми имеет дело современный эксперимент в макроскопических областях.

Поле стали рассматривать как состояние особой среды, заполняющей весь мир, — как состояние эфира. Пустое пространство было устранено из физической картины мира.

Встала задача — раскрыть природу эфира, установить его свойства с тем, чтобы объяснить закономерности поля (уравнения Максвелла).

На первых порах эфиру пытались приписать специфические механические свойства, притом весьма необычные, объясняющие его поведение как носителя поля, в частности как передатчика световых волн.

Но при всей необычности механических свойств, которые приписывались эфиру, он рассматривался как особый вид идеальной сплошной жидкости, т. е. как среда, части которой сохраняют при любых процессах свой объем, а также массу. Возникло стремление создать «механику эфира», которая должна была охватить весь круг электромагнитных явлений (и, возможно, тяготение).

2. Устранение из физики (в последней четверти 19 века) представления об абсолютно пустом пространстве привело к необходимости заново пересмотреть обоснование классической механики. Стало ясно, что движение любого тела может рассматриваться только как относительное. Но в таком случае чем объяснить преимущественную роль инерциальных систем?

Выход из затруднения был предложен Л. Ланге¹⁾. Основная идея Ланге заключается в том, что в основу механики должно быть положено определение инерциальной системы, не связанное с признанием абсолютного пространства. Предположим, что три материальные точки A , B и C свободно движутся относительно некоторой системы отсчета S , которая сама перемещается произвольным образом, но так, что все три точки движутся относительно нее по трем прямым, исходящим из одного начала O и не расположенным в одной плоскости. Если четвертая материальная точка (или n точек), не подвергающаяся воздействию внешних сил, также движется относительно системы S по прямой, то это значит, что S есть инерциальная система отсчета. Другими словами, закон инерции служит для определения инерциальной системы отсчета. Зеелигер показал, что систему отсчета, связанную с «неподвижными» звездами и применяемую в астрономии, с высокой сте-

¹⁾ L. L a n g e, Über die Wissenschaftliche Fassung des Galileischen Beharrungsgesetzes, Ber. kgl. Ges. Wiss., Math.-Phys. Kl., 1885, S. 333—351.

пенью точности можно считать инерциальной в смысле Ланге.

Определение инерциальной системы отсчета, данное Ланге, получило признание в механике; оно было затем уточнено в общей теории относительности.

В дальнейшем Г. Герц в своих «Принципах механики» предпринял попытку сформулировать основы механики в такой обобщенной форме, которая была бы свободна от представления о пустом пространстве и вместе с тем учитывала бы наличие «скрытых масс» (т. е. частей эфира), участвующих в движении материальной точки.

Основной закон механики, по Герцу, должен быть вариационным законом, т. е. должен определять особенности действительно осуществляющихся движений, в отличие от формально возможных, но нереальных в данных условиях.

В качестве такого закона Герц выдвинул свой «принцип наименьшего принуждения».

Сущность этого принципа состоит в следующем. Всякая материальная точка, по Герцу, есть система, состоящая из множества элементов, каждый из которых вообще движется по-своему. Под смещением материальной точки s следует понимать выражение $s = \sqrt{\frac{\sum m_i s_i^2}{\sum m_i}}$, где s_i — смещение i -го элемента, m_i — его масса. Поскольку движение точки совершается в окружающей среде, то действительно реализующееся смещение при данных связях есть кратчайшее (наименьшее) из всех возможных: δs должно быть минимальным. Основной принцип механики Герца может быть сформулирован так: каждая свободная точка (система) стремится сохранить состояние покоя или равномерного движения по прямейшему пути. Этот принцип является обобщением принципа инерции в механике Ньютона. Герцу такое обобщение казалось необходимым потому, что он исключал представление о движении тел в пустоте; движение тела, по Герцу, всегда происходит в среде, в эфире.

Вопреки предсказаниям современников, механика Герца не нашла широкого применения. Объясняется это тем, что с чисто механической точки зрения она не дает ничего нового по сравнению с другими вариационными

принципами. Что же касается стремления Герца выразить в законах механики наличие связи между движущимися вещественными телами и эфиром, то оно ни к чему не привело. Опыт (см. § 7) опроверг основную гипотезу Герца о том, что эфир может рассматриваться как обычная идеальная жидкость, части которой увлекаются движущимся телом и принимают участие в его движении.

Таким образом, физика конца 19 века отвергла пустое пространство Ньютона. Но попытки построить механику «заполненного пространства» — эфира — окончились неудачей.

Неудача всех попыток создать универсальную физическую механику, которая охватывала бы также действия электромагнитного поля, неудача попыток создать единую механическую картину всех физических процессов, породила у некоторых физиков и философов стремление вообще отказаться от раскрытия природы физических явлений, ограничиться «чистым описанием» явлений. Мы коротко осветим эти взгляды, поскольку указанная тенденция привела к возрождению субъективистских воззрений на пространство и время, которые получили распространение на следующем этапе развития физики — в начале 20 века.

Наиболее видным представителем субъективистского направления был Эрнст Мах.

3. Основные философские идеи Маха и связанная с ними физическая концепция с наибольшей отчетливостью сформулированы в его труде «Учение о теплоте». В этом произведении Мах выступает против того, чтобы рассматривать теплоту как род движения, против молекулярно-кинетической теории, наконец, против признания реальности атомов и молекул, т. е. против основных завоеваний физики 19 века. Как же обосновывает Мах эти взгляды?

Мах заявляет, что теплоту с равным правом можно представлять себе и как вещество. Для этого нужно только термин «количество теплоты» (которое не сохраняется в физических процессах) заменить термином «потенциал теплоты». Маху это утверждение требуется не для возрождения отвергнутого наукой представления о теплороде, а для того, чтобы всякое вещество рассматривать также как теплород. Если кто-либо желает признавать реальность вещества, говорит Мах, это дело его личного вкуса, не

имеющее отношения к действительности. «Вещество,— писал он еще в «Принципе сохранения работы»,— означает возможность явления, это — удобное слово для пробы в мыслях». Вещество «есть абстракция того же точно сорта», что и душа. Эти утверждения составляют квинт-эссенцию маховского «Учения о теплоте». Поэтому нет смысла отыскивать материальную основу явлений, структуру вещества. Задача науки — экономно описывать явления.

Вряд ли стоит в наше время опровергать этот взгляд Маха и доказывать реальность атомов и молекул. Но Мах отвергал не только атомистические воззрения. Он рассматривал и электромагнитное поле как чистую условность, как термин, удобный для описания электромагнитных явлений. С позиции «чистого описания» Мах подошел к проблеме пространства и времени.

Прежде всего он подвергает критике воззрения Ньютона на пространство и время. Мах справедливо отмечает, что физика никогда не имеет дела с абсолютным пространством и абсолютным временем. Однако, критикуя слабые стороны учения Ньютона, Мах вместе с тем отказывается и от понимания пространства и времени как форм существования материи. По Маху, не существует вообще пространства и времени как объективных форм существования вещей. Есть только события, совокупность восприятий; в процессе опытного познания «мы получаем множество различных восприятий, которые как-то упорядочены. Одновременное распределение разных «событий» мы называем пространством»¹⁾. Мы воспринимаем явления последовательно друг за другом, одно появляется после исчезновения другого; мы называем самый факт последовательности наших восприятий временем. Таким образом, утверждает Мах, пространство и время есть упорядочение, или группировка, восприятий («событий») в соответствии с другими рядами событий. Опыт показывает, что в характеристику упорядоченности можно ввести количественные отношения, которые и составляют содержание геометрии и исчисления времени.

¹⁾ Э. Мах, *Время и пространство с физической точки зрения*, в кн. «Познание и заблуждение», Изд. «Скирмунта», 1909 г., стр. 432.

На первый взгляд может показаться, что взгляды Маха на пространство и время близки к концепции Лейбница. На самом деле это не так. Лейбниц, рассматривая пространство и время как формы координации тел и явлений, указывал, что эти формы координации обусловлены в конечном счете взаимодействиями, «силами». У Лейбница геометрия основана на динамике (в широком смысле слова).

Мах, наоборот, отрывает пространство и время от материальной основы, от взаимодействия (поля). Не удивительно поэтому, что Мах в дальнейшем выступил против теории относительности.

Мах критикует также и кантовский взгляд на пространство и время как на априорные формы восприятия явлений человеческим сознанием. Он защищает мысль, что геометрия основана на опыте и может быть подтверждена только опытом. Но само понятие «опыт» Мах истолковывает не как средство познания человеком объективного мира и присущих ему закономерностей, а как совокупность восприятий, ничем не обусловленную. Поэтому истинность познания у него заключается не в соответствии наших знаний законам объективного мира; цель науки, как уже сказано выше, сводится им к экономному описанию совокупности восприятий. Поэтому, с его точки зрения, ценность неевклидовой геометрии определяется, в конечном счете, удобством ее применения для описания пространственных соотношений. Открытие в 20 веке связи между метрикой пространства-времени и распределением и движением масс опровергло этот взгляд Маха.

Критика маховских воззрений на пространство и время была дана Лениным. «Нельзя выдерживать последовательно точку зрения в философии, враждебную всякому фидеизму и всякому идеализму, — говорит Ленин, — если не признать решительно и определенно, что наши развивающиеся понятия времени и пространства *отражают* объективно-реальные время и пространство; приближаются и здесь, как и вообще, к объективной истине»¹⁾. У Маха же получается, что «...не человек со своими ощущениями существует в пространстве и времени, а пространство и время

¹⁾ В. И. Ленин, Сочинения, т. 14, Госполитиздат, 1947, стр. 164.

существуют в человеке, зависят от человека, порождаются человеком ...»¹⁾).

Только признавая пространство и время объективными формами материи, можно ставить вопрос об объяснении закономерностей этих форм, можно искать необходимые связи между пространственно-временными свойствами вещей и другими их общими свойствами, их природой — связи между геометрией и физикой.

Поэтому не удивительно, что влияние идей махизма сказалось отрицательно на развитии физики, что это влияние, как мы убедимся в дальнейшем, привело сторонников маховской теории познания к неверной трактовке теории относительности.

С этих же позиций Мах подошел и к анализу понятий механики. Если Ланге, К. Нейман и другие физики рассматривали закон инерции как определение инерциальной системы, подчеркивая тем самым преимущественную роль инерциальных систем, то Мах считает закон инерции вообще излишним. Основой механики является, по Маху, лишь один факт: два тела сообщают друг другу ускорения, направленные в противоположные стороны и находящиеся в определенном соотношении, характерном для этих тел. Можно ввести для удобства понятие массы; смысл его состоит лишь в том, что отношение масс двух тел есть обратное отношение их ускорений. Следовательно, масса m есть просто коэффициент при ускорении j . Сила, по Маху, есть лишь удобное обозначение для произведения mj . Таким образом, механика Маха «кинематизирована».

Формулировка основного закона механики, данная Махом, исключает применение механики к движению частиц, связанных полем. В самом деле, ускорение частиц происходит с запаздыванием, притом зависящим от расстояния между частицами. Если мы вводим понятие силы в каждой точке, то можем характеризовать действие поля на частицу в данный момент независимо от того, чем определяется напряженность поля в этой точке. Если же мы говорим о взаимодействии двух удаленных друг от друга

¹⁾ В. И. Ленин, Сочинения, т. 14, Госполитиздат, 1947, стр. 165.

тел, то необходимо учитывать процесс передачи действия от одного тела к другому; такой учет передачи действия у Маха отсутствует.

Но дело не только в ограниченности исходного положения механики Маха. В кинематизированной механике Маха законы сохранения (энергии, импульса, момента) не играют существенной роли. При таком понимании механики исчезает глубокая связь механического движения с другими процессами.

Мы не можем входить здесь в подробный разбор воззрений Маха в области механики. Отметим лишь еще одно утверждение Маха: относительно не только перемещение и скорость, но и ускорение тела. С этой точки зрения система Коперника и система Птолемея вполне равноправны: можно считать Землю неподвижной, а Солнце и звезды обращающимися вокруг Земли, т. е. совершающими ускоренное движение. Ошибочность этого утверждения в свете современной науки была показана в нашей литературе, в частности В. А. Фоком¹⁾.

Для маховской теоретико-познавательной концепции вообще характерны релятивизация и субъективирование физических величин, выражающих различные свойства и отношения процессов. По мнению Маха, применение той или иной совокупности параметров для описания определенной области физических явлений условно и произвольно; «параметризация» мира производится человеком по его усмотрению. Поэтому Мах и отвергал особое значение законов сохранения, поскольку величины, входящие в соответствующие уравнения, «ничем не лучше» других.

В действительности дело обстоит не так. Процесс познания, как показывает история науки, заключается, во-первых, в нахождении все более существенных параметров, во-вторых, в выяснении все более глубоких и существенных связей между различными параметрами.

Махизм был отвергнут подавляющим большинством физиков 19 века, стоявших на материалистических позициях. Однако критика махизма со стороны физиков того

¹⁾ В. А. Ф о к, Система Коперника и система Птолемея в свете общей теории относительности, Сборник «Николай Коперник», Изд-во АН СССР, 1947.

времени не могла вскрыть до конца его действительной роли в науке. Ибо механистическое мировоззрение этих физиков само оказывалось неудовлетворительным в свете новых открытий, оно вставало перед непрерывно растущими трудностями; отвергая махизм, физики-механисты не могли указать пути выхода из этих трудностей.

Ошибочность махизма была до конца вскрыта марксизмом в известном труде В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм».

§ 6. Взгляды Энгельса на пространство и время

1. Основное противоречие классической физики второй половины 19 века состояло в стремлении объяснить вновь открытые наукой закономерности вещества и поля на основе примитивных представлений о материи, движении и взаимодействии. Мировоззрение физиков, создавших теорию электромагнитного поля (Максвелл, Герц), молекулярно-кинетическую теорию (Больцман), было механистическим, неокартезианским; невозможность же построения последовательной механической картины мира приводила некоторых исследователей к кантианству или позитивизму.

Ограниченность мировоззрения была серьезной помехой в деле преодоления противоречий ньютоновой концепции пространства и времени. Представление о пустом пространстве было отвергнуто, но мысль об изначальности и неизменности объемов простейших элементов материи — частей эфира — сохранилась. Сохранилось также ньютоново представление об абсолютном универсальном времени, равно как и об универсальности евклидовой геометрии. Вместе с понятием пустого пространства было отброшено понятие абсолютного движения, но основы ньютоновой механики, хотя и трактуемые несколько иначе, чем во времена Ньютона, полностью сохранились.

Трудности и противоречия физики второй половины 19 века могли бы быть разрешены значительно легче и быстрее, если бы выдающиеся исследователи эпохи встали на позиции последовательно научного материалистического мировоззрения. Такое мировоззрение — диалектический материализм — было создано Марксом и Энгельсом

еще в 40-х годах 19 столетия. Но оно оставалось неизвестным естествоиспытателям, поскольку первая и главная задача марксизма в то время заключалась в раскрытии основных закономерностей и тенденций капиталистического общества, в выяснении путей его коренного преобразования. Творцы диалектического материализма не имели возможности систематически и детально разрабатывать и излагать свои воззрения на природу (если не считать нескольких глав в «Анти-Дюринге» Энгельса).

Диалектический материализм был создан путем фундаментальной переработки и обобщения важнейших достижений материалистической философии и классической немецкой идеалистической философии (в особенности Гегеля), а также обобщения важнейших открытий естествознания. Разработка новых идей стала возможной на основе исследования, главным образом, законов сравнительно быстро развивающегося объекта — общества. Вместе с тем Энгельс уделял много внимания теоретическому осмысливанию достижений естествознания той эпохи. Однако, как уже было сказано, систематизировать все полученные им результаты в области естествознания ему не удалось. Важнейшие идеи Энгельса по философии природы, собранные в «Диалектике природы», увидели свет только в 1925 г.

Проблеме пространства и времени Энгельс уделил сравнительно небольшое место. И тем не менее анализ его взглядов на пространство и время исключительно важен, поскольку эти взгляды являются органической частью диалектико-материалистического мировоззрения в целом. Отправляясь от воззрений основателей марксизма на пространство и время и применяя их метод, можно наметить пути решения новых проблем в этой области, выдвинутых последующим развитием науки.

2. Основное и исходное положение диалектического материализма заключается в том, что все без исключения объекты в мире представляют собой различные формы изменяющейся материи, превращающиеся друг в друга и возникающие одна из другой.

В свете этого учения одним из важнейших законов физики и всего естествознания является закон сохранения и превращения энергии, выражающий на языке физики

единство материального мира. Энгельс, говоря о значении открытия закона сохранения и превращения энергии, писал: «Единство всего движения в природе теперь уже не просто философское утверждение, а естественнонаучный факт»¹⁾. Открытием этого закона физика создала прочный естественнонаучный фундамент для материалистического мировоззрения. Согласно Энгельсу, движение неразрывно связано с материей, оно есть способ существования материи. Движение понимается Энгельсом как изменение в самом широком смысле этого слова.

Общее, что имеется в исходном положении диалектического материализма с воззрениями других материалистических философских учений, заключается в признании материальности мира, в убеждении, что любой объект окружающего нас мира возникает только из других объектов и не может бесследно исчезнуть. Но, в отличие от других материалистических учений, диалектический материализм отрицает сводимость материи к одной какой-либо простейшей форме (или к немногим простейшим формам), которая могла бы рассматриваться как изначальная и неизменная «материя вообще».

Энгельс подчеркивал, что каждая форма материи — будь то звездная система, организм или молекула — качественно своеобразна и не может поэтому рассматриваться как простой конгломерат элементов, свойства которого сводятся к свойствам этих элементов. Качественное своеобразие объекта создается той особой формой внутренних связей, которая характерна для данного объекта.

Все свойства (параметры) объекта обусловлены в конечном счете его структурой, его связями, совершающимися в нем специфическими процессами. Вместе с тем многообразие существующих видов материи образует единое связанное целое, в котором каждый вид занимает определенное место. Отрицание сводимости материальных объектов к простейшим, изначальным формам означает, что так называемые «элементарные» частицы материи на самом деле всегда сложны, «структурны»;

¹⁾ Ф. Э н г е л ь с, Диалектика природы, Госполитиздат, 1955, стр. 155.

их «бесструктурность» сохраняется лишь на определенной ступени знания, когда наука еще не располагает данными об их структуре.

Утверждение о несводимости материи к простейшим элементам тесно связано с пониманием движения как изменения вообще, как активности, всегда присущей материи, являющейся способом ее существования. Само существование любого объекта состоит в определенной форме (или формах) его внутренних и внешних взаимодействий, делающих возможным его непрерывное воспроизведение, сохранение. Без взаимодействия, без определенного, характерного для него более или менее стационарного внутреннего процесса объект немыслим. Современная физика подтвердила этот взгляд, признав «заряды» (в общем смысле этого слова) и внутреннюю энергию (массу) любой частицы вещества основными ее параметрами.

Любое движение, изменение противоречиво. Оно представляет собой неразрывное единство противоположных сторон — устойчивости и изменчивости. Эта особенность движения тесно связана с многообразием и единством материи.

Движение любого материального объекта есть самодвижение в том смысле, что тенденция к изменению состояния заложена в самом объекте; это обусловлено внутренней сложностью объекта, противоречивостью различных его сторон.

Атрибутивность движения проявляется также в том, что каждый конкретный объект, равно как и определенный вид объектов, преходящ и существует только в определенных условиях. Нет абсолютно неизменных объектов, будь то более простые или более сложные, нет и абсолютно неизменных свойств. Каждый объект есть часть более общей системы, и при известных условиях его индивидуальность и устойчивость теряются.

Из сказанного вытекают и основные положения теории познания диалектического материализма — учение об объективности познания, о соотношении между абсолютной и относительной истиной, о принципиальной познаваемости любых свойств и отношений, присущих предметам и явлениям.

Можно показать, что все эти положения неразрывно связаны друг с другом. Отрицание любого из них неизбежно приводит к логической непоследовательности либо же (в конечном счете) к отказу от идеи изменчивости мира или его материальности.

3. Энгельс рассматривает пространство и время как общие формы существования материи. Это значит, прежде всего, что пространство и время объективно существуют, их свойства и закономерности не априорны и не субъективны, а присущи им независимо от того, познаем мы их или не познаем. В этом отношении взгляды диалектического материализма совпадают с точкой зрения материализма вообще.

Приведенное определение пространства и времени указывает также на кардинальное отличие воззрений диалектического материализма от ньютоновой концепции. С точки зрения Энгельса, представлять себе, что формы существования материи могут вести самостоятельное от нее существование, что они могут быть там, где материи нет, — значит расчленить мир на отдельные стороны и формы, вырвать эти стороны из реальной связи и объявить их самостоятельными объектами, друг с другом не связанными. Другими словами, это значит стать на позиции метафизические, антидиалектические. Энгельс справедливо иронизирует над таким методом мышления. Он пишет: «Это старая история. Сперва создают абстракции, отвлекая их от чувственных вещей, а затем желают познавать их чувственно, желают видеть время и обонять пространство... Разумеется, обе эти формы существования материи без материи суть ничто, пустые представления, абстракции, существующие только в нашей голове»¹).

Метафизик сначала отрывает пространство от протяженных вещей, а время — от реальных процессов, а затем говорит об их вневещности, об абсолютности и даже непознаваемости этих абстракций, заимствованных из материального мира. В действительности пространство и время не существуют вне протяженных вещей и длящихся материальных процессов.

¹) Ф. Э н г е л ь с, Диалектика природы, Госполитиздат, 1955, стр. 187.

Отличие этих форм бытия друг от друга, по Энгельсу, состоит в том, что пространство есть всеобщая форма сосуществования тел, время — всеобщая форма смены явлений; находиться в пространстве — это значит быть «в форме расположения одного возле другого», во времени — «в форме последовательности одного после другого».

Но Энгельс отнюдь не сводит пространство и время к «порядку вещей и явлений». Полемизируя с Дюрингом, он указывает, что время есть нечто отличное от отдельных длящихся процессов. Смысл этого утверждения состоит в том, что время и пространство есть общие формы существования материи и поэтому имеются особые закономерности, характерные для этих форм.

Основные свойства пространства — протяженность и вместе с тем координированность его частей, времени — длительность и смена моментов. Неразрывность этих свойств (которые у Ньютона и Лейбница выступали в отрыве друг от друга) отражает противоречивость сторон движения — его устойчивости и изменчивости¹⁾.

Всеобщность пространства и времени заключается в том, что они являются формами бытия всех без исключения объектов и процессов.

Естественно возникают вопросы: связаны ли друг с другом закономерности пространства и времени? чем определяются общие закономерности пространства и времени, от каких факторов они зависят? является ли геометрия Евклида универсальной?

Энгельс не анализировал эти проблемы. Однако, руководствуясь основными идеями диалектического материализма, можно на эти вопросы дать однозначные ответы.

Если пространство и время — общие формы существования материи, то их закономерности должны быть в связи друг с другом. Далее, поскольку нет универсальных и вечных форм материи, не может быть и универсальных, ни от чего не зависящих и ничем не обусловленных закономерностей пространства и времени. Разумеется, законы геометрии не зависят от конкретного строения того или иного объекта, поскольку закономерности пространства

¹⁾ Этот вопрос разработан в исследованиях В. И. Свидерского. См. его «Пространство и время», М., 1958.

имеют общий характер, но они должны определяться наиболее общими законами *связей* тел, общими закономерностями *полей*, осуществляющих эти связи. Какова зависимость между геометрическими и динамическими закономерностями, невозможно решить на основании философских соображений; решение этой проблемы принадлежит физике, и, как мы увидим в дальнейшем, физика впоследствии действительно наметила решение этого вопроса. Но принципиальный ответ об относительности и обусловленности закономерностей пространства и времени, о возможности различных геометрий можно дать на основе чисто философской, и в этом эвристическая сила научной философии.

ГЛАВА II

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

§ 7. Поле, пространство и время

1. Современная физическая теория пространства и времени — теория относительности — исторически возникла из электродинамики движущихся сред, т. е. из теории взаимодействия движущихся систем заряженных частиц, связанных электромагнитным полем. Поэтому необходимо прежде всего рассмотреть общие представления о материальных телах как системах частиц, связанных полем, — представления, сформировавшиеся в классической электронной теории.

Предварительно напомним основные положения электронной теории, поскольку они понадобятся для анализа интересующих нас вопросов.

Согласно электронной теории Лоренца, все макроскопические тела состоят из частиц, несущих дискретные электрические заряды — положительные или отрицательные — и обладающих определенной массой. Лоренц называл их электронами в широком смысле слова. Заряды являются источниками поля и вместе с тем приемниками действия поля; следовательно, поле осуществляет связь между частицами вещества, передает действия от одних частиц к другим.

В основу электронной теории Лоренца¹⁾ положены определенные законы взаимодействия электромагнитного поля и заряженных частиц, представляющие собой обоб-

¹⁾ Г. А. Л о р е н ц, Теория электронов, Гостехиздат, М.— Л., 1958.

шение опыта. Суть их заключается в следующем. 1) Источником электрического поля являются электроны (в широком смысле слова). 2) При движении электрона вокруг него образуется магнитное поле, которое не имеет особых вещественных источников. Электрическое и магнитное поля характеризуются в каждой точке напряженностями \mathbf{E} и \mathbf{H} , измеряемыми действием поля на единичный «пробный» заряд или элементарный круговой ток. 3) При изменении во времени магнитного поля в какой-либо точке в ней возникает электрическое поле, и, наоборот, вокруг изменяющегося электрического поля возникает магнитное. Этот процесс распространяется в пространстве с определенной скоростью c , характерной для электромагнитного поля, — со скоростью света. 4) Поле действует только на электроны; там, где плотность заряда равна нулю, поле действовать не может. Сила \mathbf{F} , испытываемая электроном, состоит из двух частей, зависящих соответственно от электрической и магнитной напряженностей: $\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + \frac{1}{c}[\mathbf{v} \mathbf{H}])$, где \mathbf{v} — скорость электрона, e — его заряд.

Таким образом, электрон производит поле, которое действует динамически на другие электроны.

Как уже было отмечено, все взаимодействия распространяются в поле со скоростью света. Следовательно, сила, действующая на электрон в данный момент, зависит от положений и скоростей других электронов в предшествующие моменты времени (запаздывающее действие).

Что же такое электромагнитное поле? В конце 19 века его рассматривали как особое состояние мировой универсальной среды — эфира. Создатель электронной теории Лоренц отказывался решать вопрос, сводится ли поле к смещениям или механическим движениям элементов эфира или же оно вообще не связано с какими-либо механическими перемещениями частей среды. Однако он явно склонялся ко второй возможности — по причинам, о которых мы скажем в дальнейшем. Лоренц предпочитал говорить просто о некотором состоянии эфира, проявляющемся в динамических действиях на электроны и связанном с энергией и импульсом особого рода.

Что же такое электрон — носитель заряда? Единственное, что о нем могла сказать электронная теория, своди-

лось к утверждению, что электрон есть модификация (особое состояние) эфира; электрон отличается от эфира, во-первых, тем, что является источником электрического поля, а при движении — и магнитного поля; во-вторых, тем, что он — единственный приемник механического действия поля. В этом заключается, как говорил Лоренц, субстанциальность заряда.

Таким образом, субстанциальность электронов, в отличие от поля, состоит в том, что электрон способен испытывать механические действия, части же эфира не испытывают пондеромоторного действия. Таковы представления о материи в лоренцевой электронной теории: существует «первоматерия» — мировой эфир, модификациями которого являются дискретные заряды и электромагнитные поля.

Электронная теория внесла глубокие изменения в ньютоновы представления о движении. Поскольку электрон неразрывно связан с полем, движение электрона меняет это поле.

Рассмотрим подробнее поле, связанное с электроном в разных состояниях движения. В неподвижном состоянии электрон создает электрическое (электростатическое) поле. Энергия поля локализована в эфире. Когда электрон движется инерциально, с постоянной по величине и направлению скоростью, вокруг него существует не только электрическое, но и стационарное магнитное поле. Это поле как бы сопровождает электрон при его движении, оно связано с данным электроном. Электрическое поле равномерно движущегося электрона отличается от электрического поля неподвижного электрона тем, что оно не обладает сферической симметрией, как в последнем случае; напряженность поля больше в направлениях, перпендикулярных направлению движения; электрическое поле равномерно движущегося электрона такое же, как у заряженного сплюснутого эллипсоида вращения. Магнитное поле, создаваемое равномерно движущимся зарядом, симметрично относительно направления движения, вектор напряженности его в каждой точке перпендикулярен вектору напряженности электрического поля и направлению движения.

При неравномерном движении электрона сопровождающее его поле не сохраняет своей энергии и импульса;

часть энергии расходуется на излучение, зависящее от ускорения электрона. Поле излучения отделяется от поля электрона и распространяется далее независимо от него со скоростью света. Поле излучения, отпочковывающееся от поля электрона, имеет иную структуру, нежели поле, связанное с электроном. Поле излучения поперечно, векторы электрической и магнитной напряженности направлены перпендикулярно друг к другу и направлению распространения.

Таким образом, существует два основных типа электромагнитного поля: свободное поле — поле излучения, существующее независимо от определенных носителей заряда, и связанное поле, «принадлежащее» определенным заряженным частицам. Однако противоположность этих типов поля относительна. Это было ясно еще в классической физике, поскольку уже в конце 19 века была установлена генетическая связь этих двух типов поля: свободное поле возникает при излучении его системой заряженных частиц и, в свою очередь, поглощаясь заряженной системой, изменяет связанное поле этих частиц. Общность обоих типов поля вытекает и из того обстоятельства, что они подчиняются одним и тем же закономерностям — уравнениям Лоренца — Максвелла.

Основные положения электронной теории были подтверждены экспериментально. Это не означало, однако, что положенные в ее основу представления о связи заряженных частиц с электромагнитным полем свободны от противоречий. В электронной теории оставался неясным основной вопрос о структуре электрического заряда. Если считать заряд электрона распределенным в пространстве, то необходимо предположить существование еще иного, неэлектрического поля, обеспечивающего недробимость заряда, связывающего его «элементы» в неделимое целое (образно говоря, противодействующего разлету электрона на части). Если же считать заряд точечным, то энергия его собственного поля, сконцентрированная главным образом вблизи него, оказывается бесконечной, что не имеет физического смысла. Эти трудности классической теории электромагнитного поля свидетельствовали о том, что «замкнутая» теория чисто электромагнитного поля невозможна. Однако для исследования макроскопических тел

и процессов классическая электродинамика оказалась в высокой степени плодотворной.

2. Важнейшим результатом электронной теории явилось новое воззрение на основные свойства частиц и тел, в частности на пространственно-временные свойства. До электронной теории такие фундаментальные свойства частицы, как масса и объем, считались абсолютно неизменными. В классической физике масса была синонимом вещества и со времен Ньютона считалась величиной изначальной, ничем не обусловленной. Электронная теория привела к гипотезе, что масса электрона обусловлена созданным им полем и изменяется в зависимости от энергии поля, связанного с электроном. Структура же поля, связанного с электроном, как уже было отмечено, изменяется со скоростью последнего. Следовательно, и масса частицы изменяется вместе с изменением структуры поля. Когда электрон движется со значительной скоростью, сравнимой со скоростью света, его поле (т. е. распределение напряженностей поля) становится иным, нежели у неподвижного электрона, причем с приближением скорости электрона к скорости света напряженности поля стремятся к бесконечности. Соответственно стремится к бесконечности и энергия и импульс деформированного поля электрона. Поэтому и масса электрона, связанная с полем, при приближении его скорости к скорости света возрастает, стремясь к бесконечности. Так на основе электронной теории возникла полевая теория массы, т. е. объяснение инертности электрона энергией его поля.

По Лоренцу, «объем» отдельного электрона также зависит от движения. Если принять, что в состоянии покоя электрон имеет форму шара, то при движении он должен принять (в стационарном состоянии) форму сплюсненного в направлении движения эллипсоида и его объем уменьшается. Это допущение Лоренца коренным образом противоречило представлениям классической физики о свойстве элементарной частицы сохранять неизменный объем.

Существенно изменяются при движении и свойства тела, т. е. системы заряженных частиц. Силы, связывающие заряженные частицы в устойчивую систему, в направлении движения оказываются больше, чем в направлениях, пер-

пендикулярных скорости, причем это отношение растет с приближением скорости тела к скорости света. Соответственно происходит сжатие тела в направлении движения и уменьшение объема. Простым расчетом можно показать, что величина сжатия приблизительно пропорциональна v^2/c^2 .

В более поздних исследованиях (в 1904 г.) Лоренц показал, что с увеличением скорости замедляется и темп процессов в движущемся теле. Это замедление, по Лоренцу, связано с увеличением массы частиц со скоростью.

Из сказанного вытекает важное следствие. Скорость света оказывается *предельной* для скорости движения любой вещественной частицы (т. е. частицы с массой, не равной нулю). Скорость частицы может как угодно мало отличаться от скорости света, но не может достигнуть значения скорости света.

Но все это относится к движению частиц вещества относительно *эфира*. Если же относить движение частицы к другой системе отсчета, связанной с телом, то, по Лоренцу, эта относительная скорость может быть и больше c (но не больше $2c$, поскольку для каждого из тел c является предельной скоростью).

Положение о паличии в природе предельной скорости явилось прямым следствием классической электронной теории, поскольку в этой теории все элементарные частицы вещества считались носителями элементарного электрического заряда и, следовательно, связанными с полем.

3. Электронная теория Лоренца дала определенный ответ на кардинальный вопрос, поставленный электродинамикой движущихся сред: как представить себе связь между эфиром и частицами вещества? Если вещество и эфир просто «сосуществуют», как две независимые субстанции, причем через эфир передаются действия частиц вещества друг на друга, то эфир должен сам испытывать воздействия частиц, его части должны приходить в движение под влиянием этих воздействий. Такая гипотеза была предложена Г. Герцем. Однако она оказалась противоречащей опыту¹⁾. Оставалось принять противоположное допущение, которое и было сделано Лоренцем: части

¹⁾ Л. И. М а н д е л ь ш т а м, Собр. соч., т. 5, Изд-во АН СССР, М.— Л., 1950, стр. 112.

эфира не испытывают динамического воздействия со стороны частиц вещества, следовательно, эфир абсолютно неподвижен. Электроны представляют собою модификации эфира, и *только им* присуще движение. Так появилась гипотеза абсолютно неподвижного эфира.

В понимании Лоренца эфир имеет гораздо большее сходство с пустым пространством, чем в гипотезе Герца. Эфиру приписывается протяженность, неподвижность, он абсолютно пронизан для частиц вещества. Его субстанциальность проявляется лишь в том, что частицы вещества и электромагнитное поле представляются как его особые состояния. Но в таком случае эфир, будучи «материализованным» абсолютным пространством, может служить базисом для *абсолютной системы отсчета*. Это его свойство должно проявиться прежде всего в том, что свет распространяется с характерной для вакуума скоростью только по отношению к эфиру; по отношению же к любой материальной системе, движущейся сквозь эфир с некоторой скоростью v , скорость света должна быть иной, чем относительно неподвижного эфира. В частности, если свет распространяется в том же направлении, в котором движется система частиц, скорость света относительно системы должна быть равна $c \pm v$.

Отсюда также следует, что и законы электромагнитного поля — уравнения Лоренца — Максвелла, — включающие c как существенный параметр, должны быть различны в разных инерциальных системах, движущихся друг относительно друга. Это ясно из того обстоятельства, что скорости электронов, от которых зависит интенсивность сопровождающего их поля, согласно Лоренцу, должны относиться только к неподвижному эфиру, в котором поле создается благодаря движению электронов. Следовательно, из лоренцевой концепции эфира получается, что скорость электрона динамически является абсолютной скоростью, ее нельзя рассматривать как скорость данного электрона — источника поля — относительно вещественных тел. Это обстоятельство подчеркивает и абсолютный характер поля в лоренцевой теории. Отсюда же, далее, следует, что законы электромагнитного поля не подчиняются принципу относительности, как это имеет место для законов механики.

Рассмотрим для примера взаимодействие двух электронов, в данный момент неподвижных друг относительно друга. Если предположить, что они неподвижны также относительно эфира, т. е. находятся в состоянии абсолютного покоя, то между ними действует только электрическая (электростатическая) сила отталкивания или притяжения — в зависимости от знаков зарядов. Если же принять, что оба электрона совместно движутся относительно эфира, то между ними будут действовать и магнитные силы. Следовательно, появляется принципиальная возможность установить скорость движения системы, состоящей из заряженных частиц, путем измерения электромагнитных взаимодействий в самой системе, т. е. определить абсолютное значение скорости системы в неподвижном эфире. Электронная теория Лоренца в ее первоначальном виде, таким образом, *исключала принцип относительности*.

Этот результат парадоксален. В самом деле, электронная теория кардинальным образом изменила физические представления о материи, движении, взаимодействии. Из физики исчезло представление о твердом теле как совокупности частиц неизменного размера и массы, связанных мгновенными дальнедействующими силами, которое служило основой для идеи абсолютно пустого пространства. А наряду с этим электронная теория Лоренца допускает существование неподвижного эфира, придавая тем самым физическую реальность абсолютному пространству и времени и указывая на возможность реального установления базиса абсолютно неподвижной системы отсчета. Это казалось невозможным даже Ньютону, так как находилось в противоречии с принципом относительности Галилея.

Последующий опыт показал, что парадокса на самом деле не существует.

Результаты опытов, ставивших целью обнаружить эффекты движения (речь идет о так называемых эффектах второго порядка относительно v/c), хорошо известны. Мы в нескольких словах напомним о двух важнейших опытах — Майкельсона и Троутона — Нобля.

В опыте Майкельсона стремились обнаружить разность времен прохождения световых лучей по направлению движения Земли и перпендикулярно этому направ-

лению, точнее, разность хода обоих лучей. Многочисленные опыты дали отрицательный результат; они не привели к установлению абсолютной скорости Земли по отношению к эфиру, или эфирного «ветра» относительно Земли.

Сущность опыта Троутона и Нобля заключается в следующем. Заряженный конденсатор, находящийся на поверхности Земли, должен был бы, как и любая система движущихся сквозь эфир зарядов, создавать в эфире магнитное поле. Можно показать, что при этом условии заряджение конденсатора, наклоненного под некоторым углом к направлению движения Земли, должно было бы привести к возникновению вращающего момента, под действием которого конденсатор стремился бы установиться в направлении абсолютного движения. При многократных повторениях этого опыта подобные явления не были обнаружены. И этот опыт не привел к обнаружению абсолютного движения Земли.

Таким образом, эксперимент доказал справедливость принципа относительности и для электромагнитных процессов; гипотеза неподвижного эфира вступила в противоречие с данными опыта. Опыт показал — в противоречии с представлением Лоренца об эфире, — что законы электромагнитных процессов не зависят от скорости переноса системы, в которой эти процессы происходят, подобно тому как законы механического движения вещественных тел не зависят от общей скорости системы, в которой совершаются взаимодействия и движения этих тел. Уравнения Максвелла — Лоренца должны быть справедливы в любой замкнутой неускоренной системе отсчета, они должны быть инвариантны (неизменны) при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Скорость света, измеренная в любой инерциальной системе, должна быть численно одной и той же.

Но опыт исключал также и гипотезу о подвижном эфире. Поэтому путь разрешения противоречия между выводом об абсолютности характера движения заряженной системы в эфире, с одной стороны, и необходимостью принять принцип относительности также для электромагнитных процессов, с другой, который Лоренцу казался единственно возможным, можно охарактеризовать так: сохранив представление об электромагнитном поле как

состоянии неподвижного эфира, найти в то же время условия, при которых действия поля в движущейся системе частиц будут удовлетворять принципу относительности. Необходимо было найти условия, при которых движение системы заряженных частиц как целого фактически не сказывается на взаимодействиях электронов внутри системы.

Математически задача сводилась к нахождению условий инвариантности уравнений Максвелла — Лоренца при переходе от «абсолютной» системы отсчета S , связанной с эфиром, к системе отсчета S' , инерциально движущейся относительно эфира. Последнюю задачу Лоренцу удалось в основном разрешить.

4. Основная идея Лоренца, окончательно сформулированная в его последних работах по электродинамике движущихся тел ¹⁾, состояла в следующем: принцип относительности для системы частиц, связанных полем, осуществляется в том случае, если само движение тела — системы заряженных частиц — по отношению к эфиру так изменяет некоторые свойства частиц и их взаимодействия, что явления в инерциально движущемся теле происходят так же, как в неподвижном теле. Если дело обстоит именно так, то по ходу явлений внутри инерциально движущейся системы невозможно определить ее скорость как целого; в этом, по мнению Лоренца, и заключается физический смысл принципа относительности.

Выше (в пункте 2 этого параграфа) было показано, как именно влияет движение заряженной частицы сквозь эфир на ее основные свойства — массу и размер. Теперь необходимо выяснить, как будет изменяться (преобразовываться) поле в движущейся системе, если принцип относительности справедлив и для поля.

Рассмотрим, например, систему заряженных частиц, находящуюся на Земле. Мы обнаруживаем, что заряженная частица, неподвижная относительно Земли, действует на другие заряженные частицы с электростатической силой; мы говорим, что эта частица создает вокруг себя только электрическое поле, но не магнитное. Верно ли это?

¹⁾ См. Л. И. М а н д е л ь ш т а м, Собр. соч., т. 5, гл. V, Изд-во АН СССР, М.— Л., 1950.

Можем ли мы утверждать, что *истинное* поле, создаваемое частицей, в действительности является электрическим, а не электромагнитным? Нет, не можем, заявляет Лоренц. Напротив, поскольку Земля движется сквозь эфир, электрон, движущийся совместно с Землей, будет создавать именно электромагнитное поле. Но опыт показывает, что это истинное электромагнитное поле будет *эффективно* проявляться в системе отсчета, связанной с Землей, как поле *электростатическое*. Выходит, что эффективное поле, воспринимаемое в движущейся системе заряженных частиц, не совпадает с истинным полем в эфире. Таковы факты, которые мы объяснить не можем, но из которых мы должны исходить. Основное допущение Лоренца заключалось в том, что только для эффективных полей и должен быть справедлив принцип относительности, который не имеет места для истинного поля.

Лоренц прежде всего ставит задачу — найти зависимость между напряженностями истинного поля \mathbf{E} и \mathbf{H} в абсолютно неподвижной (в эфире) системе отсчета S и напряженностями эффективного поля \mathbf{E}' и \mathbf{H}' в некоторой подвижной системе отсчета S' . Соотношение между \mathbf{E}' и \mathbf{H}' , с одной стороны, и \mathbf{E} и \mathbf{H} , с другой, можно получить на основании силы Лоренца. В самом деле, сила, действующая в системе S на единичный заряд, движущийся сквозь эфир со скоростью v , равна $\mathbf{E} + \frac{1}{c}[\mathbf{v}\mathbf{H}]$. Эта сила будет проявляться в системе S' как эффективная электрическая напряженность \mathbf{E}' . Следовательно, $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \frac{1}{c}[\mathbf{v}\mathbf{H}]$. Эффективная магнитная напряженность \mathbf{H}' , как это ясно из физических соображений, должна зависеть и от \mathbf{E} и от \mathbf{H} . Однако вид этой зависимости Лоренц нашел только путем догадки. Соотношение $\mathbf{H}' = \mathbf{H} + \frac{1}{c}[\mathbf{E}\mathbf{v}]$ было предложено Лоренцем на основании соображения, что именно при такой зависимости \mathbf{H}' от \mathbf{E} и \mathbf{H} уравнения Максвелла — Лоренца в первом приближении останутся инвариантными.

Это очень важный вывод. Первоначально электронная теория принимала, что магнитное поле возникает при движении электрона относительно эфира и его напряжен-

ность зависит от абсолютной скорости электрона. Но затем Лоренц приходит к заключению, что это верно лишь для истинного поля. Эффективное поле, действующее в движущейся системе зарядов, разделяется на электрическое и магнитное не абсолютно, а относительно; само разделение поля зависит, по Лоренцу, от скорости движения системы как целого относительно эфира.

Теперь остается определить, при каких условиях эффективные напряженности \mathbf{E}' и \mathbf{H}' подчиняются уравнениям Максвелла — Лоренца, имеющим *тот же вид*, что и уравнения для истинных величин в неподвижной системе отсчета. Оказывается, для этого необходимо, чтобы при переходе от абсолютной системы отсчета S к подвижной S' *пространственные координаты и время* преобразовывались не так, как в уравнениях Галилея. Последнее отчасти следует из физических соображений, изложенных выше. В классической механике скорость тела не влияет на его размеры. Это находит свое выражение в галилеевых преобразованиях. Система же заряженных частиц сжимается в направлении движения, а темпы процессов замедляются со скоростью. Поэтому и уравнения преобразования координат и времени должны отличаться от галилеевых.

Уравнения преобразования, найденные Лоренцем, в простейшем случае (когда движение инерциальной системы S' относительно неподвижной системы S происходит вдоль оси x) имеют вид

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

При таких преобразованиях уравнения Максвелла — Лоренца остаются инвариантными, т. е. в инерциально движущейся системе отсчета сохраняются те же соотношения между эффективными величинами \mathbf{E}' и \mathbf{H}' , что и между «истинными» величинами в системе, абсолютно покоящейся¹⁾.

¹⁾ Лоренцу не удалось получить точного выражения для преобразования плотности заряда при переходе к движущейся системе отсчета. Это было выполнено Эйнштейном.

Очень важно то обстоятельство, что величина c скорости распространения электромагнитных действий в системе S' численно остается такой же, как и в «абсолютной» системе S . Если бы скорость света c в какой-либо системе отсчета зависела от скорости движения зарядов v , то уравнения Максвелла — Лоренца в этой системе были бы несправедливы.

Таковы условия применения принципа относительности к электромагнитным процессам, которые были найдены Лоренцем. Каков же физический смысл этих условий, как они реализуются в природе? Мы ограничимся сначала приближенным случаем, когда можно пренебречь величинами второго порядка (т. е. зависящими от v^2/c^2).

Представим себе, что линейный ток движется со скоростью v вдоль своего направления. Рядом с ним движется с той же скоростью точечный заряд. Допустим, что и ток и заряд неподвижны относительно Земли и перемещаются вместе с ней сквозь эфир. Как будет взаимодействовать эта система?

В системе отсчета S' , связанной с Землей, картина не изменится: ток окружен «эффektivным» магнитным полем, которое не будет действовать на заряд. В абсолютной же системе картина должна быть другая. Движущийся сквозь эфир заряд представляет собой конвекционный электрический ток; ток в проводнике также является не чистым током проводимости, а суммой тока проводимости электронов и тока конвекции электронов и ионов, образующих проводник и переносящихся сквозь эфир со скоростью v . Значит, магнитное поле тока должно действовать на движущийся заряд в зависимости от знака заряда; ток должен либо притягивать его, либо отталкивать. Как же в таком случае объяснить тот факт, что заряд не испытывает никакого действия? Лоренц дает такое объяснение. Вследствие движения сквозь эфир ионы решетки проводника создают магнитное поле, в котором движутся электроны проводимости. Магнитное поле ионов отклоняет электроны и создает неравномерное распределение их внутри проводника. Поэтому на проводнике образуется плотность заряда, которая создает электрическое поле, действующее на движущийся точечный заряд в противоположном смысле по сравнению с магнитным полем. Это электрическое

поле компенсирует действие магнитного поля тока. Таким образом, «истинные» поля в эфире, по Лоренцу, отличаются от «эффективных» полей в инерциально движущейся системе, но они компенсируют друг друга так, что получается аналогичное действие в обеих системах. Лоренц называет оба состояния материальной системы, получающиеся в S и в S' , *соответственными состояниями*.

В соответственных состояниях, по Лоренцу, различны силы, действующие между частицами, различны массы частиц, различны и пространственные расстояния между частицами системы. Все указанные физические величины изменяются при инерциальном движении материальной системы сквозь эфир; но изменения таковы, что явления в соответственных состояниях протекают одинаково. Поэтому, находясь внутри системы, обнаружить ее движение невозможно. Совместность изменений при движении системы, наряду с напряжениями поля, силами и массами, также и пространственных расстояний и промежутков времени и приводит к относительности электромагнитных процессов, к одинаковости их протекания в инерциальных системах.

Рассмотрим с этой точки зрения опыт Майкельсона. Время прохождения светового луча вдоль плеча интерферометра, параллельного направлению движения Земли, и вдоль плеча, перпендикулярного направлению движения, в абсолютной системе не одинаково. В первом случае время должно быть меньше, чем во втором. Но тут вступает в действие компенсирующий эффект — сокращение длины плеча, направленного по движению. Почему происходит такое сокращение? На это Лоренц дает следующий ответ: система заряженных частиц при движении сквозь эфир изменяет свою равновесную конфигурацию, сплющивается в направлении движения; если предположить, что все силы, действующие между частицами вещества, так же изменяются при движении, как и силы электрические (а для этого достаточно предположить, что молекулярные силы по своей природе суть электрические силы), то движущийся стержень должен сократиться по направлению движения. Такова, по Лоренцу, причина, вызывающая укорочение движущегося сквозь эфир тела в направлении движения.

Это дает Лоренцу возможность объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона. Если измерить длину плеча, прикладывая к нему единичный масштаб, движущийся вместе с прибором, то никакого сокращения длины плеча не обнаружится: масштаб сокращается в том же отношении, как и измеряемый стержень. Поэтому получается, что эффективная скорость света c' численно равна c — скорости света в неподвижной системе.

Изменение длины, так называемое лоренцево сокращение, отличается от обычного изменения длины под действием сжимающей силы тем, что при лоренцевом сокращении пропорционально уменьшается объем тела, между тем как при обычном одностороннем сжатии уменьшение объема частично компенсируется поперечным растяжением.

В дальнейшем сторонники лоренцевой точки зрения дали более детальные истолкования физического смысла найденных им уравнений преобразования. Так, Л. Яноши¹⁾ высказывает мнение, что изменение размеров системы частиц со скоростью вызывается единой причиной — конечной скоростью передачи действия, т. е. тем, что связь частиц системы осуществляется посредством поля.

Яноши показывает, что деформация тела в зависимости от скорости будет иметь место всегда, независимо от природы сил взаимодействия между частицами, если только эти силы являются запаздывающими и зависят от скорости тела как целого. При этом условие устойчивости конфигурации тела сохранится в результате изменения его скорости, но тело будет испытывать деформацию (сжатие) в направлении движения, приблизительно равную $\alpha \frac{v^2}{c^2}$, где $\alpha < 1$.

5. Открытие Лоренцем новых уравнений преобразования для координат пространства и времени имело первостепенное значение для развития представлений о пространстве и времени. Протяженность тел и темп совершающихся в них процессов оказались зависящими от поля, связывающего частицы тела, а вследствие этого и от скорости движения тела как целого, поскольку эффективное поле в системе частиц само зависит от скорости системы.

¹⁾ УФН 62, вып. 3, 1957.

Однако физический смысл этих преобразований до теории относительности не был достаточно ясен. Сжатие тела в зависимости от скорости движения было объяснено Лоренцем как следствие изменения сил, связывающих частицы тела, при движении последнего. Замедление темпа процессов представлялось как следствие возрастания масс частиц со скоростью. Однако физический смысл так называемого местного времени (т. е. сдвига времени в движущейся системе S' в зависимости от координаты в системе S , равного $\frac{vx}{c^2}$) не был вскрыт Лоренцем. Только в последующих исследованиях сторонников лоренцевой концепции ¹⁾, уже много позже после создания теории относительности, была предложена модель, показывающая, каким образом может быть реализован сдвиг фаз в движущейся системе вдоль направления ее движения относительно системы S .

«Модель» местного времени такова. Пусть вдоль оси x со скоростью v движется цилиндр, одновременно вращающийся вокруг оси x . Можно показать, что цилиндр при этом испытывает кручение и что между двумя точками цилиндра, находящимися на расстоянии r_{12} вдоль его оси, имеет место разность фаз, равная $\frac{vr_{12}}{c^2}$. Если рассматривать любую равномерно вращающуюся точку цилиндра в качестве местных часов в системе S' , то можно получить разность показаний часов в обеих точках движущейся системы отсчета S' , связанной с цилиндром.

Однако лоренцева трактовка уравнений преобразования сталкивается еще с одной трудностью. Уравнения преобразования *обратимы*. Это значит, что тело, неподвижное в системе S' , будет иметь меньший размер в системе S и, наоборот, тело, покоящееся в S , будет иметь меньший размер в S' . Между тем, согласно трактовке Лоренца, сжатие тела обусловлено его движением по отношению к эфиру, но не по отношению к произвольной инерциальной системе отсчета. Выходит, что различные инерциальные системы физически неравноправны, хотя «внутри» системы ее движение как целого обнаружить невозможно.

¹⁾ См. цитированную выше статью Л. Яноши.

Эта неравноправность различных инерциальных систем по сути дела противоречит уравнениям преобразования, и в этом кардинальный недостаток лоренцевой трактовки, не устраненный и в позднейших работах последователей этой точки зрения.

Так, например, Л. Яноши делает предположение о наличии преимущественной «*K*-системы», возможно связанной со стационарным гравитационным полем в большой области мира. Но вместе с тем он признает групповой характер лоренцевых преобразований и, следовательно, их обратимость, а это противоречит признанию какой-либо преимущественной инерциальной системы.

Подытожим еще раз лоренцеву трактовку уравнений преобразования. Уравнения преобразования Лоренца были найдены в результате развития учения об электромагнитном поле и его связи с веществом. Они были получены Лоренцем на основе двух положений:

а) Положения о независимости в замкнутой системе законов электромагнитного поля, характеризуемого эффективными величинами, от скорости движения системы в целом, следовательно, о зависимости эффективных действий электромагнитного поля (его напряженностей) только от относительных положений и скоростей источника поля («практический» принцип относительности, по терминологии Л. И. Мандельштама).

б) Допущения о наличии определенных соотношений между эффективными и истинными значениями электрической и магнитной напряженностей в зависимости от скорости системы заряженных частиц. Второе положение непосредственно из первого не вытекает.

Наряду с этими двумя основными положениями, обобщающими совокупный опыт электродинамики движущихся тел, Лоренц делает еще важное допущение о том, что любые силы должны так же изменяться со скоростью, как и электромагнитные.

Следовательно, уравнения преобразования Лоренца вытекают из общих свойств поля и законов его связи с частицами вещества. Эта мысль впервые была высказана П. Ланжевром в его работах по теории относительности¹⁾.

¹⁾ П. Л а н ж е в е н, Эволюция понятия пространства и времени, Избранные произведения, М., 1949.

Мы подчеркнули здесь это обстоятельство потому, что открытие лоренцевых уравнений преобразования иногда представляют как следствие простой констатации некоторых единичных фактов — отрицательного результата опыта Майкельсона, установления коэффициента увлечения в опыте Физо и других. На самом деле простой констатации отдельных фактов недостаточно, чтобы получить лоренцевы уравнения преобразования. Потребовалось сначала сделать на основе этих фактов некоторые обобщения, касающиеся свойств поля, и уже из этих обобщений Лоренцу удалось получить свои уравнения. Это был первый шаг в физике по пути коренного преобразования представлений о пространстве и времени.

Однако Лоренц не отказался от различения «истинных» и эффективных характеристик поля и тем самым от различения «истинных» и эффективных длин и промежутков времени, несмотря на принципиальную невозможность отличить их друг от друга во всех известных опытах. Поэтому он представлял себе, что тело, движущееся с данной скоростью v сквозь эфир, сокращается в направлении движения на определенную величину, пропорциональную $\frac{v^2}{c^2}$, *само по себе*, безотносительно к другим телам. Отсюда следует, что два тела, движущиеся инерциально друг относительно друга и, следовательно, обладающие разными скоростями движения по отношению к эфиру, должны испытывать различную деформацию. Но этот результат противоречит факту обратимости преобразований координат пространства и времени для обоих тел, если с каждым из этих тел связать инерциальную систему отсчета.

Лоренц сохранил концепцию абсолютного пространства, правда не пустого, а сливающегося с эфиром, и абсолютного времени; но вместе с тем было показано, что в замкнутой системе заряженных частиц, движущейся сквозь эфир, не существует никаких реальных возможностей обнаружить скорость этого движения, а следовательно, обнаружить абсолютное пространство и время.

Причиной противопоставления Лоренцем «истинных» и эффективных величин было то обстоятельство, что он не отказался от взгляда на поле как на состояние универсальной неподвижной среды — эфира. Лоренц видел лишь

единственную альтернативу: либо признать эфир как «субстанцию поля» простой разновидностью вещества, либо рассматривать его как «сверхсубстанцию», как перво-материю. В первом случае эфиру приписывали подвижность его частей как друг относительно друга, так и относительно частиц вещества и тем самым способность элементов эфира увлекаться другими движущимися частицами. Когда же это допущение оказалось в противоречии с опытом, Лоренц стал на диаметрально противоположную точку зрения: эфир абсолютно пронцаем для вещества, следовательно, не участвует в движениях частиц вещества и поэтому абсолютно неподвижен. Значит, можно говорить лишь об универсальной неподвижной среде — носителе электромагнитных полей, представляющих особые состояния этой мировой среды. Но эфир может существовать и без таких состояний. В этом случае его единственное возможное проявление состоит в том, что с ним может быть связана абсолютная система отсчета. Существование эфира обуславливает изменение свойств вещественных частиц при изменении абсолютного состояния движения последних. Такова была вторая сторона альтернативы. Но оказалось, что и она неверна, и мыслима совершенно иная постановка вопроса: попросту игнорировать эфир как среду, с которой может быть связана система отсчета, поскольку он ни в чем не обнаруживает себя, а рассматривать лишь поля в *реальных вещественных системах*. На эту точку зрения стал Эйнштейн.

§ 8. Специальная теория относительности Эйнштейна

1. Эйнштейн, так же как и Лоренц, ставил себе целью разрешить трудности, возникшие в теории электромагнитных явлений, происходящих в движущихся телах. Его первая работа в этой области так и называлась: «К электродинамике движущихся тел». Решение этой задачи привело Эйнштейна к более общему результату — к созданию современной физической теории пространства и времени.

При построении своей теории Эйнштейн принимает в качестве первого исходного положения расширенный принцип относительности, распространенный на электромагнитное поле, а следовательно, и на любые физические

явления, поскольку в то время любые процессы сводились либо к механическим (включая и тяготение), либо к электромагнитным. Принцип относительности Эйнштейн рассматривает как обобщение опыта, как факт, который не нуждается в обосновании. Таким образом, Эйнштейн принимает за исходное положение теории принцип, который Лоренц стремился обосновать.

Поскольку электромагнитные явления подпадают под принцип относительности, лоренцево представление об абсолютном электромагнитном поле как состоянии мирового эфира должно быть отвергнуто. В самом деле, когда происходит сближение магнита и тока, сущность процесса, с точки зрения Лоренца, различна для случая, когда движется магнит (с данной скоростью), а ток неподвижен, и для случая обратного, когда магнит неподвижен, а ток по отношению к нему движется с такой же скоростью. Между тем явления в обоих случаях ничем не различаются. Поэтому и в области электромагнитных явлений можно говорить только об относительной скорости, а не об абсолютной (по отношению к мировой системе отсчета).

Но в таком случае понятие эфира как базиса системы отсчета оказывается лишним, и говорить о движении тела по отношению к эфиру не имеет смысла. Физический смысл, с точки зрения Эйнштейна, имеет движение частицы (тела) относительно замкнутой вещественной системы, с которой можно связать инерциальную систему отсчета.

Однако, распространив принцип относительности на поле, мы должны разрешить основную проблему, возникшую в оптике и электродинамике движущихся тел: к чему следует относить конечную скорость распространения электромагнитного поля, т. е. скорость света? Если эта скорость равна c по отношению к одной инерциальной системе S , то относительно другой инерциальной системы S' , движущейся по отношению к S , скорость света, согласно обычному закону сложения скоростей, должна быть иной. Но в таком случае, как мы видели, электромагнитные процессы в системе S' будут протекать по-другому, чем в системе S , и принцип относительности окажется нарушенным.

Выход, найденный Эйнштейном, состоял в отказе от обычного закона сложения скоростей — прежде всего

применительно к свету. Скорость одного и того же светового импульса в обеих системах — и в S и в S' — численно одна и та же, она равна c , хотя обе системы движутся друг относительно друга. В этом заключается кардинальное отличие точек зрения Эйнштейна и Лоренца. Лоренц пытался провести различие между скоростью света в абсолютной системе S , действительно равной c , и скоростью того же светового импульса в любой другой инерциальной системе S' , движущейся относительно S , лишь эффективно (при измерении ее масштабами и часами системы S') равной c , а в действительности отличающейся от c . Эйнштейн сразу же отказывается признать какое-либо реальное различие скорости света в разных инерциальных системах. Поле реально существует, запаздывание действий всегда имеет место, но скорость передачи одного и того же электромагнитного импульса в любой инерциальной системе одинакова, независимо от того, как движется источник, пославший импульс. Это — второе исходное положение Эйнштейна.

Постулаты теории Эйнштейна требуют радикального пересмотра старых представлений о пространстве и времени, поскольку галилеевы преобразования пространственно-временных координат оказываются неприменимыми. Поэтому Эйнштейн начинает с анализа физических способов координации явлений (по его терминологии — событий) — их одновременности и последовательности.

2. Временная координация явлений, происходящих в очень малой области пространства, в теории относительности остается такой же, как и в классической физике. В качестве измерителя времени — часов — берется достаточно равномерный периодический процесс. Промежуток времени между двумя событиями, происходящими в данном месте, сравнивается с двумя фазами периодического процесса (показаниями «стрелок» часов). Предполагается, что совпадение данного события с определенной фазой периодического процесса может быть измерено сколь угодно точно — событие рассматривается как точечное.

Однако координация разноместных событий (в конечной области пространства) нуждается в особом определении. Проблема временной координации разноместных событий оказывается связанной и с вопросом о простран-

ственной координации. Пространственная координация событий в теории относительности оказывается, вообще говоря, сложной проблемой. Для определения пространственного расстояния необходимы совокупность неподвижных друг по отношению к другу твердых тел и неизменный (твердый) масштаб. В теории относительности трудность состоит в том, что понятие абсолютно твердого тела не имеет смысла: абсолютно твердых тел не может быть потому, что их существование противоречит факту конечности скорости распространения любых действий. Если бы существовали абсолютно твердые тела, то действие от одной точки тела передавалось бы к другим его точкам мгновенно.

Тем не менее в пределах одной инерциальной системы понятие твердого тела обычно применяется и в теории относительности. «Твердость» тела усматривается только в том, что при медленном перемещении его можно считать неизменным по размеру. Как будет вести себя твердое тело при быстром движении относительно системы отсчета, это вопрос, который заранее неясен и требует исследования. Таким образом, пока мы остаемся в пределах одной и той же инерциальной системы, пространственные отношения сохраняются такими же, как и в старой физике; геометрия Евклида применяется по-прежнему. Однако, поскольку идеально твердых тел в природе не существует, можно говорить лишь о «твердом» состоянии тела, которое всегда относится к одному и тому же моменту времени, одинаковому для всех частей тела. Таким образом, определение пространственных величин — если не принимать априори существования идеально твердых тел — требует точного определения понятия «одновременности во всей системе отсчета».

Каков же физический критерий «одновременности во всей системе отсчета»?

Представим себе, что все точки системы отсчета снабжены часами, имеющими совершенно одинаковое устройство, другими словами, что в каждой достаточно малой части системы отсчета совершаются одинаковые периодические процессы.

Согласно определению Эйнштейна, двое часов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, идут

синхронно, если среднее арифметическое из показаний часов I, полученных при отправлении светового сигнала и при его возвращении после отражения от часов II, равно принятому при помощи этого же сигнала показанию часов II : $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$.

Такое определение одновременности разноместных явлений, данное Эйнштейном, может показаться чисто условным. Почему для синхронизации часов обязательно применять световые сигналы? Конечно, световые сигналы (радиосигналы) обычно употребляются в практике. Но, очевидно, для установления синхронности часов в данной системе отсчета пригоден любой процесс, идущий с постоянной скоростью и не зависящий от направления распространения. Для этого можно использовать, например, инерциальное движение каких-либо вещественных частиц.

Разумеется, синхронность разноместных часов только в одной инерциальной системе может быть установлена при помощи инерциально движущихся частиц с таким же успехом, как и посредством световых сигналов. Однако если мы попытаемся при помощи одного и того же сигнала установить синхронность часов в *разных* системах отсчета, движущихся друг относительно друга, то единственный процесс, пригодный для этой цели,— это распространение электромагнитных действий. Ибо только этот процесс протекает с одинаковой скоростью в любой инерциальной системе отсчета.

Но это не единственный довод в пользу данного выше определения одновременности. Из факта равенства скорости света в разных инерциальных системах отсчета следует, что эта скорость есть максимальная критическая скорость, с которой может распространяться действие от одних частиц к другим, поскольку при прибавлении к скорости света дополнительной скорости опять получается то же значение скорости света. А это обстоятельство имеет принципиальное значение.

В самом деле, одновременность явлений (событий), происходящих в разных местах системы, означает, что влияние одного события на другое в рассматриваемый момент невозможно, так как такое влияние может передаваться только с конечной скоростью. Можно сказать, что

ни одно из одновременно протекающих событий не может быть причиной другого. Как бы близко друг от друга ни протекали разные события, но если они одновременны, то они независимы друг от друга, поскольку влияние одной частицы на другую есть процесс, идущий с конечной скоростью. Следовательно, их отношение может быть только отношением сосуществования, т. е. отношением чисто пространственным.

Отсюда следует, что критерием чисто пространственного отношения двух разноместных событий является невозможность каким бы то ни было образом влиять друг на друга. Поэтому существенно определять одновременность (или разновременность) при помощи скорости света в вакууме, поскольку никакое влияние сколь угодно близких событий друг на друга невозможно, если их нельзя связать предельно быстрым действием. Таким образом, метод определения одновременности Эйнштейна отвечает требованию независимости любых одновременных разноместных событий в данной системе. Очевидно, что данное определение одновременности позволяет определять и одинаковость хода часов, равенство их периодов.

Таковы соображения, показывающие, что эйнштейновское определение одновременности отнюдь не является условным.

Высказывались предположения, что понятие твердого тела вообще не требуется в теории относительности. Если имеются единственные часы в одной точке и возможность посылать световые сигналы, то в этой системе можно осуществлять измерение времени и расстояний (модель радиолокационной станции). Отсюда иногда делается заключение, что понятие пространства является подчиненным, а понятие времени — основным.

Измерения расстояния указанным способом действительно возможны. Однако делать отсюда вывод, что понятие пространства является производным, «подчиненным» понятию времени, нет оснований. Ибо само предположение о наличии сигнала, идущего с постоянной скоростью, уже предполагает существование пространства наряду со временем, поскольку скорость определяется через отношение расстояния к промежутку времени. Более того,

любые часы, т. е. любые периодические процессы, осуществляются всегда в *пространственной области*. То, что эта область может быть очень мала, несущественно с принципиальной точки зрения. Представление о периодическом процессе, осуществляющемся в точке пространства, есть недопустимая абстракция, ибо всякий периодический процесс обязательно включает перемещение (например, колебания атомов в молекуле) и связан со стационарностью условий в данной — пусть очень малой — области пространства. Поэтому любые физически реализуемые часы обязательно предполагают наличие сосуществующих частиц, т. е. «твердого» тела, служащего базисом системы отсчета. Другими словами, время немыслимо без пространства (так же, как пространство не существует вне времени).

Вместе с тем модель радиолокационной станции в специальной теории относительности имеет несомненные преимущества. Она позволяет лучше понять то существенное обстоятельство, что пространственные и временные отношения есть отношения *координации явлений*. Важность этой стороны дела станет яснее из дальнейшего изложения. Эта модель приобретает еще более важное значение в общей теории относительности (см. главу III).

3. Особенности новых представлений о пространстве и времени выступают отчетливо, когда мы переходим к сопоставлению пространственной и временной координат одних и тех же событий в *разных* системах отсчета, движущихся друг относительно друга. При данном выше определении одновременности два события, одновременные в некоторой системе отсчета A , не будут одновременными в любой другой системе отсчета B , движущейся относительно A с некоторой скоростью v .

Пусть, например, источник света L , неподвижный в связанной с ним инерциальной системе отсчета A и движущийся со скоростью v в системе отсчета B , испускает световую волну. Поскольку скорость света в любой инерциальной системе является постоянной и равной c , а синхронность часов устанавливается посредством светового сигнала, то показания часов в A и B не могут совпадать. Одновременность оказывается понятием относительным. Это расходится с обычным представлением об абсолютном смысле одновременности событий, но находится

в согласии с указанными выше исходными положениями теории. Закон, связывающий пространственные и временные координаты одного и того же события в двух разных движущихся друг относительно друга инерциальных системах отсчета (преобразования Лоренца), был выведен Эйнштейном из условия, что скорость света численно одинакова в обеих системах отсчета. К этому обычно добавляется еще условие однородности пространства и времени.

Таким образом, исходя из указанных выше «постулатов», Эйнштейн получил преобразования, ранее найденные Лоренцем. Однако физический смысл этих преобразований в понимании Эйнштейна существенно отличается от того толкования, которое давал им Лоренц.

Во-первых, Лоренц сначала придавал реальный смысл только преобразованию пространственных координат, из которого непосредственно следует так называемое лоренцево сокращение движущегося тела. Лишь в дальнейшем он попытался дать физическое толкование уравнению преобразования времени — в той мере, в какой оно выражает замедление движущихся часов, т. е. содержит в правой части уравнения фактор $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Что же касается понятия местного времени, зависимости времени в движущейся системе от координат места, в котором совершается событие, то, как уже было отмечено в предыдущем параграфе, оно оставалось у Лоренца чисто формальным; лишь в дальнейшем оно было истолковано как смещение фазы колебательного процесса, происходящего в часах, в зависимости от координат оси, вдоль которой направлено движение часов.

Во-вторых, преобразование координат и времени в трактовке Лоренца имеет смысл только для движущейся твердой системы, частицы которой связаны электромагнитными силами; изменение внутренних сил в движущемся теле вызывает его сжатие и замедление темпа происходящих в нем процессов. Действительные пространство и время в целом у Лоренца остаются абсолютными и универсальными.

Эйнштейн вкладывает иной смысл в преобразования Лоренца. Он рассматривает пространство и время как определенные формы координированности всех событий

по отношению к замкнутой системе тел, с которой связана инерциальная система отсчета. Преобразования Лоренца характеризуют реальное изменение координаты событий при переходе от данной инерциальной системы отсчета к любой другой инерциальной системе отсчета. У Эйнштейна все инерциальные системы столь же физически равноправны, как и данная система. Поэтому у Эйнштейна понятие местного времени не является формальной, чисто математической «промежуточной» величиной. Это понятие выражает относительность одновременности в разных системах отсчета: совокупность разноместных событий, одновременных в одной системе отсчета S , неодновременна в другой системе S' , движущейся по отношению к первой, и наоборот. И это справедливо для любых событий независимо от того, представляют ли эти события совокупность явлений в связанном теле или же в несвязанных друг с другом телах (частицах).

Примером относительности одновременности может служить абберация света (в релятивистском понимании). Классическое объяснение астрономической абберации света (для определенности мы будем говорить о годичной абберации) состояло в том, что относительная скорость света, испускаемого «неподвижной» звездой, по отношению к телескопу, находящемуся на движущейся Земле, различна в зависимости от скорости движения Земли по орбите. За время, в течение которого свет проходит вдоль тубуса телескопа со скоростью c , сам телескоп смещается по орбите на расстояние, пропорциональное скорости v . В разных (в частности, противоположных) точках земной орбиты скорость Земли различна. Поэтому для наблюдения звезды, стоящей в зените, угол наклона телескопа к вертикали должен быть равным $\sim v/c$ (v — скорость Земли по орбите).

Эйнштейн дает совершенно иное объяснение абберации света. Фронт световой волны является поверхностью, в которую световые колебания приходят одновременно. Пусть в инерциальной системе отсчета S участок волновой поверхности P нормален к лучам, идущим от звезды. Тогда в инерциальной системе отсчета S' , связанной с движущейся Землей (и, следовательно, с телескопом), фронт волны, т. е. участок поверхности, куда *одновременно* прихо-

дят световые колебания, не совпадает с P , а наклонен к ней на угол, приближенно равный v/c . Скорость света в системе отсчета S' численно та же, что и в системе отсчета S , но одновременными будут другие фазы световых колебаний, нежели в S . Можно сказать, что фронт световой волны, идущей от данной звезды, в системе S' в данный момент проходит по другим частицам газа, чем в системе S . Важно подчеркнуть, что астрономическая абберация, обусловленная переходом от системы отсчета, связанной с Землей в одном ее положении на орбите, к другой системе отсчета, связанной с Землей в другом ее положении на орбите, отнюдь не зависит от изменения движения источников света — звезд. Скорость v относится к движению одной системы отсчета относительно другой. Если бы годичная абберация была обусловлена относительным движением Земли и звезд, то она зависела бы также от расстояния между Землей и звездой.

Таким образом, координация событий в системах отсчета S и S' различна. Уравнения преобразования Лоренца и выражают это различие. При этом формула преобразования для времени ясно показывает, что хотя события, одновременные в S , неодновременны в любой другой системе отсчета, движущейся инерциально по отношению к S , но в любой инерциальной системе воздействия этих событий друг на друга невозможны, поскольку смещение Δt_{12} во времени любой пары событий 1 и 2, разделенных расстоянием Δx_{12} , таково, что свет за это время не может дойти от места события 1 к месту события 2. В самом деле, это смещение во времени можно представить в виде $\frac{\Delta x_{12}}{c} \frac{v}{c}$,

а так как v/c всегда меньше 1, то Δt_{12} всегда меньше времени $\Delta x_{12}/c$, которое необходимо для прохождения светового сигнала на расстояние Δx_{12} .

Из лоренцевых уравнений преобразования Эйнштейн выводит заключение об относительности длины (расстояния) и промежутка времени между двумя событиями. В самом деле, что следует называть «длиной» стержня? Эйнштейн показывает, что возможны два способа определения длины, которые дают совпадающие результаты только в том случае, если измеряемый стержень покоится в данной системе отсчета (или движется со скоростью,

пренебрежимо малой по сравнению со скоростью света): 1) измерение путем непосредственного прикладывания неизменного масштаба к стержню и 2) измерение тем же масштабом расстояния между «метками» в данной системе отсчета, *одновременно* совпадающими с концами стержня. Если же стержень движется достаточно быстро относительно системы отсчета, то применим только второй способ измерения, и притом не только практически, но и принципиально, ибо твердый масштаб системы K и движущийся в этой системе стержень находятся в разных условиях. Масштаб, практически неподвижный в системе K , остается «твердым телом», пространственные же свойства движущегося стержня меняются при изменении его скорости. Если рассматривать сигналы (импульсы), исходящие из разных точек стержня (в частности, из его концов), которые являются одновременными в «сопутствующей» ему системе отсчета S' , то эти сигналы в системе S не будут одновременными. Таким образом, под «длиной движущегося стержня» (расстоянием между его концами) в системе S следует понимать только ту величину, которая получается при втором методе измерения. При этом результат измерения длины совершенно одинаковых стержней — покоящегося в данной системе отсчета S и быстро движущегося (в свою очередь он покоится в некоторой системе S') — будет различен. Именно, движущийся стержень будет короче неподвижного в отношении

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} : 1.$$

Аналогичный результат получается и для промежутков времени. Сравнивая показания движущихся часов с показаниями часов, покоящихся в данной системе (пространственно совпадающими с движущимися в данный момент), найдем, что промежуток времени между двумя событиями в движущемся теле, измеренный по движущимся вместе с ним часам, короче промежутка времени, измеренного по часам в системе S .

Релятивистское сокращение времени было подтверждено в ряде опытов. Так, например, продолжительность жизни быстро распадающихся частиц может изменяться в сотни и тысячи раз в зависимости от скорости.

Непосредственная проверка сокращения времени в движущемся теле может быть произведена путем наблюдения поперечного доплер-эффекта. Частота излучения, испускаемого движущимся ядром, атомом или молекулой, изменяется не только в направлении движения, как этого требует и классическая теория, но, согласно теории относительности, и перпендикулярно движению; это — поперечный доплер-эффект. Величина изменения частоты вследствие поперечного доплер-эффекта очень мала, так как она пропорциональна v^2/c^2 , и для видимого излучения, испускаемого возбужденными атомами (как это имело место в опыте Айвса в 1938 г.), ее трудно измерить. Обнаруженный в 1958 г. эффект Мёссбауэра ¹⁾, заключающийся в резонансном поглощении γ -лучей ядрами, открыл возможность точной проверки поперечного доплер-эффекта для γ -излучения. В эффекте Мёссбауэра возбужденные ядра атомов (железа, никеля, индия и других элементов) испускают γ -лучи, которые затем поглощаются невозбужденными атомными ядрами такого же вещества, т. е. имеет место резонансное поглощение. В обычных условиях это поглощение очень мало, вследствие того что ядро испытывает заметную отдачу как при испускании γ -кванта, так и при его поглощении; это приводит к уменьшению энергии γ -кванта (и соответственно его частоты) и нарушению резонанса. Мёссбауэр показал, что если возбужденное ядро принадлежит твердому телу, находящемуся при низкой температуре, то потери энергии при отдаче могут настолько уменьшиться, что оказывается возможным резонансное поглощение γ -квантов такими же ядрами. Но этот резонанс может быть снова нарушен, если поглотитель будет приведен в движение относительно источника, вследствие поперечного доплер-эффекта, причем острота резонанса настолько велика, что он будет нарушен даже при сравнительно небольших скоростях. В опыте, выполненном группой английских физиков, было действительно обнаружено влияние поперечного доплер-эффекта на резонансное поглощение γ -лучей и тем самым еще раз подтверждена реальность релятивистского сокращения времени.

¹⁾ УФН 22, 4, 1960; статьи Р. Мёссбауэра, П. Паунда, Ф. Л. Шапиро.

Важно отметить, что в теории относительности релятивистские эффекты изменения длины и длительности обратимы. Стержень, покоящийся в системе отсчета S , но измеренный в системе отсчета S' , будет короче такого же стержня, покоящегося в S' . То же самое справедливо для часов. Однако обратимость результатов измерения имеет место только в том случае, если обе системы отсчета, S и S' , являются инерциальными. Если же система отсчета, связанная с одним из тел, движется ускоренно, то обратимость не имеет места. Так, например, если часы B , сначала совпадавшие с часами A и, следовательно, покоившиеся в точке A системы S , затем были приведены в ускоренное движение, например описали окружность в этой системе и, наконец, снова были совмещены с точкой A системы S , то окажется, что часы B отстали по сравнению с часами, все время покоившимися в A (этот вопрос будет рассмотрен подробнее в следующей главе).

Из сказанного ясна особенность эйнштейновской трактовки сокращения длин и длительностей в движущемся теле. В системе отсчета, в которой данное тело покоится, — если внешние физические условия и внутренние взаимодействия остаются неизменными, — оно имеет определенный размер, зависящий от этих факторов (равно как и определенный характерный для тела темп процессов); в сопутствующей движущемуся телу системе отсчета никакого сокращения нет. Оно имеет место только в системе отсчета, в которой тело движется. Следовательно, размер тела и длительность процесса, по Эйнштейну, имеют определенные значения не сами по себе, а лишь по отношению к той или иной системе отсчета, т. е. к той или иной замкнутой системе тел, с которой связана инерциальная система отсчета. Другими словами, размер (длина, объем) представляет собой отношение к другому выбранному телу — масштабу; когда измеряемое тело движется по отношению к системе отсчета S , то его отношение к такому же масштабу, остающемуся неподвижным в системе отсчета S , изменяется. Как было показано выше, это изменение связано с тем, что действия различных точек движущегося тела, одновременные в сопутствующей ему системе S' , в системе отсчета S уже не являются одновременными.

Изменение пространственных и временных величин при изменении скорости тела происходит *совместно*. При этом определенная величина $ds^2 = -dx^2 - dy^2 - dz^2 + c^2 dt^2$, связывающая расстояние между местами близких событий и разделяющий их промежуток времени, остается неизменной (инвариантной) во всех инерциальных системах отсчета. Величина ds носит название интервала между двумя событиями, разность координат которых равна соответственно dx , dy , dz , а разность времени dt . Из постоянства ds следует, что если промежуток времени между данными событиями при переходе к другой инерциальной системе уменьшается, то и расстояние между ними в этой же системе отсчета сокращается, и наоборот.

Из сказанного видно, что в теории относительности вовсе не стирается различие между пространством и временем, а устанавливается лишь связь между их величинами — пространственно-временной интервал между событиями. Формально это коренное различие пространственных и временных величин сказывается в противоположности знаков, с которыми они входят в выражение интервала ¹⁾.

При простом повороте системы координат в пространстве одна компонента может возрастать только за счет уменьшения другой компоненты, так как пространственное расстояние между точками вследствие поворота системы координат изменяться не может. То обстоятельство, что в выражение интервала входят разности квадратов пространственных координат с *одинаковыми* знаками, свидетельствует об их «взаимозаменяемости», и, следовательно, равнозначности. Время же (длительность) входит в интервал с *противоположным* знаком. Поэтому оно не «замещает» пространственные координаты, а лишь изменяется согласованно с ними. Так сказывается математически качественное различие временных и пространственных величин.

В зависимости от того, могут ли два события воздействовать друг на друга (быть причиной или следствием

¹⁾ Л. И. Мандельштам, Собр. соч., т. 5, Изд-во АН СССР, М.—Л., 1950, стр. 268.

другого) или не могут, интервал имеет различный знак. Если сумма пространственных членов в ds больше временного, то интервал пространственноподобен. Это значит, что никакое воздействие событий друг на друга невозможно. В противном случае, когда воздействие возможно, интервал времениподобен.

Если интервал пространственноподобен, то в системе отсчета, в которой тело неподвижно (в так называемой собственной системе отсчета), интервал сводится к *длине*. И эта же величина, но уже как интервал, т. е. как разность dr^2 и $c^2 dt^2$, сохранится в любой инерциальной системе отсчета. Если же интервал времениподобен, то в собственной системе отсчета он сведется к *промежутку времени* между данными событиями. В любой другой инерциальной системе отсчета сохранится численное значение ds , но уже как величина интервала. Следовательно, «вещественным представителем» пространственноподобного интервала является длина тела в собственной системе отсчета; вещественным представителем времениподобного интервала является промежуток времени по часам собственной системы отсчета.

4. Выявление глубокой связи между пространственными и временными величинами отразилось на содержании основных физических теорий в области механики, электродинамики и оптики потому, что все физические величины так или иначе зависят от пространственно-временных координат. Содержащейся в лоренцевых преобразованиях зависимости между пространственными и временными величинами соответствуют зависимости и между многими другими физическими величинами. Поэтому из лоренцевых преобразований и принципа относительности был получен ряд новых закономерностей, неизвестных дорелятивистской физике. Эта работа была выполнена прежде всего Эйнштейном и продолжена рядом физиков (Планком, Минковским и др.).

Важнейшим достижением теории относительности является установление связи между такими физическими величинами, которые прежде считались независимыми друг от друга: между массой и энергией, электрическими и магнитными напряжениями, между энергией и частотой волны и другими.

Мы очень коротко отметим некоторые положения релятивистской кинематики, динамики и электродинамики, имеющие значение для дальнейшего изложения. Кинематика теории относительности коренным образом отличается от прежней кинематики. Основной закон кинематики — закон сложения скоростей — в простейшем случае одномерного движения имеет в теории относительности форму $u' = \frac{u+v}{1+\frac{uv}{c^2}}$ в отличие от закона сложения скоростей

в классической механике $u' = u + v$.

Из релятивистского закона сложения скоростей вытекает, что скорость тела не может расти беспредельно. Каковы бы ни были значения слагающих скоростей u и v (они всегда меньше c), результирующая скорость u' всегда меньше c . Следовательно, пределом (и притом недостижимым) скоростей тел является скорость света в вакууме. Большие скорости передачи действия, согласно теории относительности, вообще невозможны; это положение, впрочем, уже лежит в основе теории относительности, вытекающая непосредственно из ее исходных предпосылок. Таким образом, скорость передачи действий в электромагнитном поле (в вакууме) служит верхним пределом скорости переноса тела.

Законы динамики теории относительности, представляя собою обобщение законов классической механики, в то же время существенно отличаются от последних. Сохраняя тот же общий вид $d\mathbf{p}/dt = \mathbf{F}$ (изменение во времени импульса равно действующей внешней силе), основной дифференциальный закон динамики выражает связь между обобщенным понятием импульса и обобщенным понятием силы. Импульс в релятивистской динамике связан со скоростью соотношением $\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$, т. е. масса тела (ча-

стицы) оказывается величиной переменной, зависящей от скорости и стремящейся к бесконечности при приближении скорости частицы к скорости света. Эта закономерность, установленная еще до теории относительности для быстрых электронов, в релятивистской динамике является общей для любых вещественных частиц.

Существенно изменяется и понятие силы. Любая сила, зависящая (в покоящейся системе) только от расстояния, оказывается функцией также и скорости. В частности, кулоновская сила eE , действующая на заряженную частицу с зарядом e в точке поля с электрической напряженностью E , в движущейся системе отсчета (со скоростью v) оказывается лоренцевой силой вида $e(E + \frac{1}{c} [vH])$, где

H — напряженность магнитного поля.

Теория относительности исключает возможность мгновенной передачи сил. Всякая сила передается с конечной скоростью. Это типичное для поля представление находит выражение в понятии потока импульса, изменение которого вблизи тела вызывает изменение импульса тела во времени.

Особенно важное значение имеет установление теорией относительности общего соотношения между энергией и массой. Масса тела M пропорциональна его полной энергии E , причем $E = Mc^2$. В разных системах отсчета величина энергии тела и, следовательно, величина его массы, вообще, различны. Однако существует некоторое наименьшее значение массы для каждого тела (собственная масса, или масса покоя), пропорциональное только собственной или внутренней энергии тела. При этом не имеет значения, какова форма этой внутренней энергии тела (или системы тел). Собственная масса полностью определяется структурой тела, т. е. его составом, внутренним полем, происходящими в нем процессами, и является одной из важнейших его характеристик.

Существенно, что масса системы частиц M не равна сумме масс отдельных частиц m_i ; M изменяется при изменении внутренней энергии системы. Это обстоятельство приводит к тому, что масса стационарной связанной системы (в которой потенциальная энергия по абсолютному значению больше кинетической) *меньше* суммы масс частиц системы. Если бы мы попытались распределить массу такой системы по определенным ее компонентам, то это оказалось бы невозможным. В теории относительности связанная система не может рассматриваться как простой конгломерат независимых частиц, *она представляет собою единое образование*. Отсюда также следует, что поле свя-

занной системы не может рассматриваться как сумма полей, относящихся к отдельным частицам, входящим в систему; поле принадлежит системе в целом.

Следовательно, частица будет динамически проявлять себя по-разному в зависимости от ее движения в системе, от взаимодействия с другими частицами системы.

Имеется существенное различие между объектами, обладающими массой покоя и не обладающими ею, например фотонами. Любой объект обладает инерцией в том смысле, что он способен изменять свое состояние под действием другого тела, с которым он сталкивается. Отличие состоит в том, что объекты, имеющие массу покоя, могут испытывать ускорения, а не имеющие массы покоя — не могут. Изменение массы со скоростью было тщательно проверено экспериментально, что вполне понятно, поскольку это явление представляет не только теоретический интерес, но имеет и большое практическое значение. На динамике быстрых заряженных частиц основана работа ускорителей.

Изменчивость массы со скоростью с особой наглядностью вскрывает объективный и реальный характер этого явления. По отношению к какой-либо другой частице, совместно движущейся с данной, масса данной частицы не изменяется. Относительно же частиц, покоящихся в материальной системе, выполняющей роль системы отсчета, масса быстро движущейся частицы возрастает, в результате чего могут быть порождены новые частицы. Источником этих новых частиц, следовательно, является не быстро движущаяся частица «сама по себе», а поле, связывающее ее с относительно неподвижными частицами системы. Наконец, широкой проверке подверглось соотношение между массой и энергией, играющее столь значительную роль в ядерных реакциях, вообще в генерировании новых частиц. Можно сказать, что это соотношение получило подтверждение в практике современного производства.

В релятивистской динамике имеют место те же законы сохранения для замкнутых систем, что и в классической: законы сохранения энергии, импульса, момента количества движения. Особенно важно то, что в баланс масс системы вносят свою долю как собственные значения масс

частиц, так и значения масс Δm_i , обусловленные движением частиц в системе. Это обуславливает возможность появления новых частиц, т. е. превращения Δm_i в «собственные» массы. То обстоятельство, что Δm_i играют вполне равноправную роль с собственными массами частиц m_{i0} , и служит главным основанием для того, чтобы считать массой частицы не m_0 , а $\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$.

Релятивистская электродинамика сохраняет те же основные уравнения, что и классическая электродинамика Максвелла — Лоренца. Важнейшим новым результатом релятивистской электродинамики является вывод о преобразовании напряженности поля при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, движущейся относительно первой. Этот вывод, который получается у Эйнштейна как следствие применения лоренцевых преобразований (совместно с принципом относительности), у Лоренца послужил одним из исходных положений для получения новых уравнений преобразований. Приведенное соотношение между напряженностями поля в разных инерциальных системах исключительно важно. Одно и то же поле проявляется по-разному в разных системах. }

Выше уже было отмечено, что теория относительности не только устанавливает зависимость от скорости ряда физических величин, которые до нее считались инвариантами, но и открывает *новые* связи между этими величинами. Например, в разных системах отсчета имеется связь между значениями энергии, импульса, потока энергии и потока импульса.

Мы не ставим себе задачей рассмотреть все важнейшие результаты теории относительности в области механики, электродинамики, термодинамики, атомной физики, теории элементарных частиц и поэтому ограничимся приведенными положениями.

Мы говорили о зависимости различных величин от движения. Однако, как уже было сказано, это не означает, что протяженность, длительность, масса в основном определяются внешними отношениями.

Чтобы «отделить» влияние движения и получить характеристики тела, обусловленные только его составом и внутренними связями (его структурой), нужно измерить их

в так называемой собственной системе отсчета. Что же представляют собой собственные системы отсчета? Это системы, в которых скорость материальной системы как целого равна нулю. Именно с системами, близкими к собственным, имела дело дорелятивистская физика. Переход от собственных к несобственным системам отсчета означает переход к исследованию свойств очень быстро движущихся объектов, когда нельзя не учитывать влияния движения на пространственно-временные характеристики, а также и на другие величины, зависящие от скорости.

Особое значение собственных систем отсчета определяется именно тем, что в них физические величины характеризуют свойства тела, определяемые только его структурой и взаимодействиями частей тела. Поэтому собственная масса может служить важной характеристикой частицы независимо от ее внешних отношений; собственная масса — один из инвариантов, определяющих природу частиц. Эта особенность собственных систем отсчета проявляется в особой роли системы отсчета, связанной с центром тяжести совокупности взаимодействующих частиц. Если требуется выяснить, например, достаточна ли энергия движения ядра и налетающей на него частицы для того, чтобы могла произойти ядерная реакция, необходимо произвести расчет энергии в системе отсчета, связанной с центром тяжести (ц-системе), либо же воспользоваться такими выражениями для энергии в лабораторной системе отсчета, которые косвенно учитывают значения энергии в ц-системе. Таким образом, в собственных системах отсчета непосредственно выявляются внутренние связи совокупности частиц.

§ 9. Анализ понятий пространства и времени в специальной теории относительности

1. Теория относительности противоречит ньютоновой концепции пространства и времени как «вместилищ» тел и явлений. Для этой концепции остается чужеродным даже классический принцип относительности, т. е. доказанная опытом невозможность определить абсолютную скорость тела, поскольку понятие абсолютной скорости в концепции Ньютона имеет определенный смысл. Однако

принцип относительности классической механики не вступал в прямое противоречие с господствовавшими тогда воззрениями на пространство и время. Приходилось констатировать, что опыт не дает возможности выделить «истинную» скорость данного тела среди множества «кажущихся» скоростей, поскольку нельзя определить «истинную» скорость движения тела самого по себе и «истинную» скорость движения системы отсчета.

Но положения теории относительности о различии расстояния между местами пары одновременных событий в разных системах отсчета, о различных значениях промежутков времени между данной парой событий в разных системах отсчета явно противоречат ньютонову пониманию пространства и времени. Здесь уже речь идет не о непознаваемости объективно существующего факта, а о том, что даже в идеальном опыте, произведенном сразу в разных системах отсчета, получаются различные значения расстояния или промежутка времени, вместо *единственного* значения; ведь концы стержня, с ньютоновой точки зрения, в данный момент расположены в определенных точках абсолютного пространства, находящихся друг от друга на данном расстоянии, и если опыт (в разных системах отсчета) дает принципиально различные значения этой величины, которая, согласно ньютоновой теории, должна иметь одно-единственное значение, то это значит, что опыт противоречит теории.

Отсюда неизбежно следует вывод, что теория пространства и времени Ньютона ошибочна: нет пространства самого по себе и времени самого по себе. Множественность значений расстояния между местами двух явлений и промежутка времени, их разделяющего, говорит о том, что расстояние и промежуток времени приобретают определенное значение лишь по отношению к определенной системе тел и процессов. Это означает, что пространство и время есть *формы отношений сосуществования и последовательности, а не самостоятельные сущности*¹⁾. Отсю-

¹⁾ Мы будем для краткости, характеризуя пространственно-временные отношения, употреблять также термин «координация явлений». При этом мы имеем в виду не только порядок взаимного «расположения» явлений, но и *метрические отношения* (отношения расстояний и промежутков времени, их разделяющих).

да, далее, следует, что при отсутствии материальных явлений бессмысленно говорить о пространственных и временных отношениях. Другими словами, теория относительности логически непримирима с представлением о пустом пространстве, имеющем «собственные» размеры, и с представлением о «пустом» времени, обладающем «собственной» длительностью. В этом отношении она сделала дальнейший шаг вперед по сравнению с предшествовавшей ей теорией поля. Таким образом, физика в конце концов подтвердила правильность концепции пространства и времени как форм существования материи, принятой в современной материалистической философии.

Но эта концепция могла стать основой физической теории пространства и времени лишь после того, как она была развита в двух отношениях. Нужно было, во-первых, установить, что координация явлений (в указанном выше смысле) может быть однозначно осуществлена лишь по отношению к определенным классам систем отсчета; для инерциальных систем это было сделано путем обобщения принципа относительности на любые физические явления. Во-вторых — и это в принципиальном отношении самый важный и существенно новый шаг, — нужно было показать, что координированность явлений — отношения их сосуществования (пространственное отношение) и их последовательности (временное отношение) — в любой системе осуществляется определенным процессом, распространением предельно быстрых воздействий. Такая конкретизация указанной концепции пространства и времени могла быть произведена только в результате открытия электромагнитного поля и электронов и создания электронной теории вещества: она и была осуществлена в теории относительности.

2. Рассмотрим несколько подробнее вопрос о роли системы отсчета в современных представлениях о пространстве и времени. Как уже было сказано, система отсчета имеет в теории относительности более существенное значение, чем в классической физике. Там она рассматривалась только как *средство для измерения* расстояний и промежутков времени, имеющих для каждой пары событий вполне определенное значение независимо от системы отсчета. В теории относительности расстояния

и промежутки времени, разделяющие пару событий, остаются не полностью определенными вне отношения к какой-либо из систем отсчета. Пара событий сама по себе, независимо от системы отсчета, может быть охарактеризована только в одном отношении: она связана либо пространственноподобным интервалом, либо времениподобным. Это значит, что в любой системе отсчета указанные события в первом случае не могут находиться в причинной связи друг с другом (не могут находиться в отношении воздействия); в этом случае они происходят обязательно в *различных телах* (или различных частях тела), причем есть такая система, в которой они разделены *только пространственно*. Во втором случае причинная связь (отношение воздействия) между ними возможна; в этом случае они всегда одновременны и есть такая система отсчета, в которой они совершаются в одном и том же месте (в том же теле или части тела), т. е. разделены *только во времени*. Более точная характеристика пространственного и временного отношения событий требует их отнесения к определенной системе отсчета.

О требованиях, которым должна удовлетворять материальная система для того, чтобы служить базисом системы отсчета, уже упоминалось выше. Коротко говоря, базис должен находиться в стационарном состоянии (вернее, в квазистационарном состоянии). Это значит, что базис — это практически неизменная система тел (или тело с неизменным соотношением частей), находящаяся в практически неизменных внешних условиях. Только в стационарном состоянии базиса возможна синхронность процессов, выполняющих роль часов в различных частях системы, и достаточно точная периодичность этих процессов; в таком состоянии возможна «квазитвердость» тел (или частей тела), необходимая для определенности длины. По отношению к такой системе координации явлений будет определенной и однозначной. При произвольном же движении реального тела оно не может служить базисом системы отсчета, так как его части испытывают, вообще говоря, различные деформации и соотношения их изменяются; происходящие в теле процессы изменяют свои темпы, и их синхронность в разных частях системы нарушается. Поэтому определенной координации собы-

тий по отношению к произвольно движущимся системам не существует.

Условия, которым должна удовлетворять материальная система, необходимые для того, чтобы она могла служить базисом системы отсчета, выполняются всегда лишь приближенно и локально. Любая система тел (система частиц) может быть «носителем» системы отсчета лишь для явлений определенных масштабов. Например, система отсчета, связанная с центром тяжести двух сталкивающихся частиц, является замкнутой по отношению к этой паре частиц, вернее, по отношению к данному столкновению; если вновь возникшая система испытывает значительные внешние воздействия в течение достаточно большого промежутка времени, то она не может быть базисом для координации более длительных явлений. Другими словами, любая материальная система может считаться замкнутой лишь локально и может служить базисом системы отсчета для ограниченной последовательности явлений и ограниченного числа сосуществующих явлений. Локальный характер любой инерциальной системы отсчета не всегда принимался во внимание. Отсюда возникали многочисленные недоразумения. Например, иногда утверждают, что две инерциальные системы отсчета, из которых одна связана с легкой частицей, а другая — с системой большой массы, во всех отношениях равноценны — в силу принципа относительности. Это верно лишь постольку, поскольку обе системы отсчета действительно остаются инерциальными. Однако при взаимодействии легкой частицы с телом большой массы система отсчета, связанная с первой, уже не будет инерциальной, между тем как система отсчета, связанная с телом, практически сохранит свой инерциальный характер и при таком взаимодействии (если энергия частицы мала по сравнению с собственной энергией тела).

Следовательно, можно говорить о различной степени инерциальности разных систем отсчета. В общей теории относительности критерием инерциальности системы отсчета является соотношение $U \ll c^2$, где U — разность потенциалов тяготения на границах области, «относимой» к данной системе отсчета. Принцип эквивалентности позволяет этот критерий обобщить. Мы вернемся к вопросу

о пределах «пригодности» системы отсчета при рассмотрении общей теории относительности.

3. Теория относительности принимает, что процессом, «регулирующим» пространственно-временную координацию (в указанном выше смысле) всего многообразия явлений в любой системе отсчета, является распространение света. По-видимому, именно это обстоятельство имеют в виду, когда говорят, что постоянство скорости света выражает сущность пространства и времени (В. А. Фок). Возникает вопрос: можно ли объяснить факт постоянства скорости света, который Эйнштейн просто принимает в качестве постулата теории?

Естественно искать ответ на этот вопрос путем выяснения, какие именно физические факторы определяют пространственно-временные отношения в природе. Лейбниц и его последователи полагали, что эти отношения зависят от природы взаимодействий как внутри тел, так и между различными телами; этот взгляд подтверждается и в современной физике. Внутренние взаимодействия в теле определяют инвариантные пространственно-временные величины, внешние взаимодействия — относительные величины. Электронная теория (в широком смысле) показала, что именно электромагнитное поле является «конституирующим» фактором, связывающим атомы и молекулы в тела (мультиполи высокого порядка); оно и определяет собственный размер тела и «собственный» темп процессов, в нем происходящих. Поэтому естественным является допущение, что именно распространение электромагнитного поля существенно для внешних отношений сосуществования тел и смены явлений. Такое заключение логически вытекает из анализа пространственно-временных отношений в одной системе отсчета, данной Лоренцем. Этот анализ показывает, что размер тела (системы заряженных частиц) и длительность процесса в данной системе отсчета зависят от отношения v/c . Скорость света оказывается предельной критической величиной. Таким образом, именно поле осуществляет пространственно-временную координацию событий в любой системе.

Изложенный ход рассуждений не содержит ответа на другой вопрос: предельна ли скорость света для полей не электромагнитной природы, например для ядерного поля?

Известный нам опыт говорит в пользу того, что c есть предельная скорость и для ядерного поля. В современной теории скорость света считается скоростью распространения любого поля, кванты которого имеют собственную массу, равную нулю. Квантовая теория полей принимает предельность именно скорости света для всего семейства элементарных частиц. Тем не менее открытие сверхсветовых процессов, например, «в области» элементарной частицы, вовсе не означало бы крушения теории относительности, а лишь ограничение ее применимости.

4. Физические представления о пространстве и времени как об общих формах сосуществования и последовательности явлений соответствуют физическому представлению о материи как совокупности тел — относительно замкнутых систем частиц, связанных полями. Это соответствие выражено в исходных положениях теории относительности. Существование замкнутых систем формулируется в принципе относительности, осуществление связи между частицами через поле — в принципе конечности и одинаковости скорости света в любой инерциальной системе.

В обычных изложениях теории относительности связь между теорией пространства и времени и физической картиной мира в целом обычно не подчеркивается. Это не препятствует правильному изложению аппарата теории, но создает возможность для неправильной ее трактовки.

Сказанное вовсе не означает, что анализ теории относительности, например, в чисто геометрическом плане недопустим. Напротив, многочисленные исследования в этом направлении сыграли большую роль как в деле разработки математического аппарата теории относительности, так и в выяснении возможностей ее дальнейшего обобщения. Так, например, Ф. Франк еще в 1912 г. показал, что преобразования Лоренца могут быть получены в общем виде на основе теории групп. Если предположить, что преобразования координат пространства и времени происходят совместно, выражаются линейными и однородными зависимостями, причем эти преобразования составляют группу¹⁾, и принять, кроме того, требование относительности

¹⁾ Это значит, что два последовательных преобразования могут быть заменены одним преобразованием такого же типа.

(например, взаимности сокращения масштабов), то можно показать, что эти преобразования являются лоренцевыми. Для простейшего случая из указанных допущений получаются преобразования

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Здесь остается неопределенной величина c , которая может быть найдена только опытным путем.

Условия Франка равносильны требованию, чтобы координация событий осуществлялась процессом, обладающим конечной скоростью, равной во всех системах отсчета рассматриваемого класса, а именно в инерциальных системах.

В самом деле, требование, чтобы координаты пространства и времени преобразовывались *совместно*, может быть осуществлено только в том случае, если координация событий (в общем смысле этого слова) осуществляется не мгновенно, а посредством процесса определенной скорости, поскольку эта скорость и связывает координаты пространства и времени; в противном случае расстояния и промежутки времени являются независимыми инвариантами. Условия же линейности и однородности преобразований осуществляются в инерциальных системах отсчета ¹⁾. Таким образом, условия Франка в абстрактной форме выражают то же самое, что и постулаты Эйнштейна, за исключением утверждения, что процесс координации осуществляется светом (электромагнитным полем). Однако исследование этой абстрактной формы исходных положений теории относительности имело важное значение для разработки теории.

Очень большую роль сыграли исследования Г. Минковского, в которых уравнения теории относительности были впервые представлены в четырехмерной форме. Метод Минковского применяется и в работах А. Д. Александрова, в которых теория относительно-

¹⁾ Ср. Л. И. М а н д е л ь ш т а м, Собр. соч., т. 5, четырнадцатая лекция, Изд-во АН СССР, М.—Л., 1950.

сти формулируется как теория единого пространства-времени. А. Д. Александров исходит из идеи о соответствии пространственно-временной структуры мира его причинно-следственной структуре. Он дает такое определение пространства-времени: «Пространство-время есть множество всех событий в мире, отвлеченное от всех его свойств, кроме тех, которые определяются системой отношений воздействия одних событий на другие»¹⁾. Заменяя затем термин «воздействие» термином «предшествование», А. Д. Александров формулирует еще два исходных положения: 1) «пространство-время есть четырехмерное многообразие», 2) «пространство-время максимально однородно». Из этих положений (к которым добавляется еще требование непрерывности и дифференцируемости уравнений преобразования) могут быть получены преобразования Лоренца в общем виде. Разумеется, и в данном случае необходимо обратиться к эксперименту, чтобы определить, какие именно воздействия осуществляют координацию событий. Исходя из «наглядного представления» о мире как о совокупности тел, существующих на «фоне электромагнитного излучения», А. Д. Александров указывает, что естественно принять в качестве агента, осуществляющего пространственно-временную координацию событий, электромагнитные волны.

А. Д. Александров полагает, что его формулировка основ теории относительности более адекватно выражает ее сущность как физической теории пространства-времени, соответствующей современной физической картине мира. Однако, как мы отметили выше, по существу постулаты Эйнштейна имеют то же содержание. В своих работах А. Д. Александров подвергает критике сами термины «теория относительности» и «принцип относительности»; он заявляет, что прав был Минковский, предлагая вместо последнего термина название «постулат абсолютного мира»,

¹⁾ Вопросы философии 1, 1959, стр. 79. Мы здесь не рассматриваем более ранние работы А. Д. Александрова по обоснованию теории относительности, в частности работу, опубликованную им совместно с В. В. Овчинниковой («Вестник Ленинградского университета», № 11, 1953 г.), в которой доказывается, что принцип постоянства скорости света достаточен для получения лоренцевых преобразований.

поскольку характеристики материальных объектов — размер, напряженность поля и другие, — относительность которых была вскрыта релятивистской физикой, суть лишь проявления инвариантных, или «абсолютных», свойств этих объектов.

Однако термин «постулат абсолютного мира» вряд ли более удачен, чем «принцип относительности». Инвариантов и в дорелятивистской физике было не меньше, чем в релятивистской. Существенно, прежде всего, то, что ряд параметров тела, которые до теории относительности считались абсолютными, инвариантными, оказались на самом деле относительными. Вместе с тем теория относительности установила, что инвариантными являются величины, определяемые *только внутренними взаимодействиями* в теле. Например, масса движущейся частицы относительна, поскольку она зависит от скорости движения тела; но собственная масса частицы, взятая в связанной с частицей системе отсчета, инвариантна и относится к числу основных характеристик частицы. Длина движущегося тела относительна; но длина тела в собственной системе отсчета — инвариант, являющийся «представителем» пространственноподобного интервала в любой инерциальной системе отсчета. То же можно сказать и о напряженности электрического поля.

Теория относительности рассматривает относительные величины как вполне реальные, которые, однако, зависят не только от структуры материального объекта, но и от его отношения к другим телам. Поэтому и само название теории отнюдь не случайно¹⁾.

5. В дискуссии по теории относительности, имевшей место в нашей философской литературе в последнее десятилетие, было немало споров о том, как следует понимать релятивистские эффекты. Возник вопрос о том, можно ли считать эти эффекты, например сокращение размера тела при изменении его скорости (лоренцево сокращение), результатом каких-то физических изменений, происходящих при переходе тела от одного состояния движения

¹⁾ В этой связи необходимо отметить, что предложенное мною ранее название «теория быстрых движений» не адекватно отображает сущность теории относительности; я согласен с критикой этого термина А. Д. Александровым и другими авторами.

к другому. Аналогичные вопросы возникают и по отношению к другим релятивистским эффектам.

Положительный ответ на этот вопрос был в свое время дан Лоренцем. Лоренц рассматривал изменение размера тела при переходе его от одного состояния движения к другому (см. § 1 этой главы) как следствие реального процесса перестройки *внутренних связей* в теле, процесса, приводящего к изменению межмолекулярных сил, следствием чего и является стягивание тела в направлении движения. При таком переходе, по Лоренцу, происходит не только сокращение длины, но и изменение других его общих параметров, в частности массы тела. Если согласиться со взглядом Лоренца на указанные эффекты и рассматривать их как следствия реального процесса в теле, то можно далее предполагать, что такой процесс требует определенного времени.

Однако реальное сокращение размера движущегося тела, а также изменение других параметров Лоренц относил к единственной системе отсчета, связанной с эфиром, противопоставляя это сокращение эффективному, или кажущемуся, сокращению размера тела относительно любой другой инерциальной системы. Последующий отказ от эфира повлек за собой и отказ от лоренцевой трактовки изменения параметров тел как следствия реального физического процесса, совершающегося в них при изменении скорости движения.

Правда, в литературе 20-х годов можно еще найти высказывания в пользу реальности эффектов движения в указанном выше смысле. Так, в своей монографии «Теория относительности» Паули писал: «Следует ли вообще отбросить стремление к атомистическому пониманию лоренцева сокращения? По нашему мнению, это не так. Сокращение масштаба является не простым, а, напротив, крайне сложным процессом. Оно не имело бы места, если бы не только основные уравнения электронной теории, но и еще неизвестные законы, определяющие строение электрона, не были бы ковариантными относительно группы преобразований Лоренца. Мы должны постулировать это предположение и иметь в виду, что, когда указанные законы станут известными, теория будет в состоянии дать атомистическое объяснение поведению движущихся мас-

штабов и часов». Однако эта точка зрения поддерживается в настоящее время немногими (например, Л. Яноши).

Противоположное понимание релятивистских эффектов, теперь почти общепринятое, заключается в том, что изменение параметров тела при изменении скорости следует рассматривать только как изменение внешних (кинематических) отношений рассматриваемого тела к другим телам, с которыми связываются инерциальные системы отсчета. Это мнение основывается на том соображении, что значения относительных величин — массы, длины, длительности процессов — не однозначны, а многозначны; то или иное значение параметра получается в зависимости от значения скорости тела по отношению к той или иной инерциальной системе отсчета. Поэтому и изменение этих параметров при переходе тела от одного состояния движения к другому не однозначно в разных системах отсчета. Само изменение состояния движения тела по отношению к другому телу, с которым связывается система отсчета, может быть обусловлено внешними воздействиями не на рассматриваемое тело, а на тело, которое стало затем (после прекращения воздействия) «носителем» системы отсчета.

Таким образом, релятивистские эффекты сводятся к изменению проекций на четырехмерные оси координат некоторых инвариантных величин, которое в принципе вполне аналогично изменению проекций какой-либо трехмерной величины на три оси пространственной системы координат x, y, z . Подобно тому, как при повороте твердого стержня на некоторый угол в обычном пространстве проекции его длины на оси x, y, z могут возрасти или уменьшиться, хотя стержень не испытывает при этом никаких реальных изменений, так и изменение длины тела при изменении его скорости есть изменение пространственной проекции интервала ds в данной четырехмерной системе отсчета. Речь идет, следовательно, об изменениях отношения тела к системе отсчета.

Отсюда часто делается дальнейший вывод: относительные величины, характеризующие тело по отношению к той или иной системе отсчета, — длина, масса (как функция скорости) и другие — не имеют объективного значения; объективными характеристиками материального

объекта являются только инвариантные величины, выражающие его свойства. Этой точки зрения придерживается, в частности, М. Борн. Такое понимание относительных величин как произвольных характеристик тела объясняется тем, что отношение к системе отсчета рассматривается как создаваемое наблюдателем: мы можем выбрать произвольную систему отсчета, вовсе не связанную с материальным базисом, и относительные характеристики тела — например, его масса в такой системе отсчета — будут иметь чисто расчетный смысл.

А. Д. Александров в своих работах по теории относительности истолковывает релятивистские эффекты иначе. Он критикует взгляд, по которому система отсчета есть только субъективный способ описания состояния тела, и подчеркивает, что пространственно-временная координатная событий может иметь место только по отношению к реальным телам. Вместе с тем А. Д. Александров указывает, что имеется кардинальное разичие между инвариантом и его «проекциями». Инварианты характеризуют объективные свойства тела, присущие ему самому по себе; относительные же величины характеризуют отношения тела к другим телам — базисам различных систем отсчета.

6. Разберем этот вопрос подробнее. Очевидно, между инвариантной величиной, зависящей только от структуры тела и внутренних взаимодействий в нем, выражающей свойство тела, и «проекциями» этой величины в той или иной системе отсчета (релятивистскими эффектами), определяемыми отношением тела к системе отсчета, действительно имеется существенное различие. Однако полное противопоставление этих величин, полное противопоставление свойств отношениям нельзя признать правильным.

Прежде всего отметим, что релятивистские эффекты полностью зависят от отношения к системе отсчета только у отдельно взятой частицы, но это неверно для системы частиц.

Рассмотрим случай столкновения двух быстрых нуклонов. Согласно теории относительности, область столкновения быстрых частиц представляет собой не сферу, а эллипсоид, сплюснутый в направлении движения. Зависит ли

в нашем примере самый факт лоренцева сокращения области взаимодействия от выбора системы отсчета? Нет, не зависит. Разумеется, в разных системах отсчета каждый из нуклонов будет представляться имеющим различные размер и форму. Если, например, мы выберем такую систему отсчета, в которой один из нуклонов до столкновения покоится, то в этой системе он будет сферическим; другой нуклон окажется сплюснутым эллипсоидом. Обратная картина будет в системе отсчета, связанной со вторым нуклоном. Следовательно, *отношения* размеров обоих нуклонов различны в разных системах отсчета. Но в обеих системах отсчета (как и в любых инерциальных системах) область столкновения быстро движущихся друг по отношению к другу нуклонов будет меньше, чем область столкновения медленных (друг относительно друга) нуклонов. Значит, относительно характеристики *отдельно взятой частицы*; релятивистские же изменения в *системе частиц* не исчезают в любой системе отсчета. И это вполне естественно, поскольку данная характеристика системы частиц — размер области взаимодействия — зависит прежде всего от ее внутренних взаимодействий. Это означает, что *свойство* системы зависит от *отношений* частей системы. Поэтому абсолютное противопоставление свойств и отношений, инварианта и «проекций», неправильно. Релятивистские эффекты («проекции») столь же реальны, как и инварианты.

Рассмотрим еще один пример. При любых процессах в системе, не сопровождающихся излучением, сохраняется ее полная масса, причем в баланс массы системы в целом входят как собственные массы частиц, так и релятивистские «добавки», которые обусловлены движением и взаимодействием частиц. Если в результате столкновения нуклонов в замкнутой системе образуются новые частицы (электроны, позитроны, мезоны), то происходит соответствующее уменьшение релятивистских «добавок». Следовательно, релятивистские «добавки» массы играют такую же роль в балансе масс системы, как и собственные значения масс частиц. И те и другие входят в общий баланс массы (т. е. инвариантную собственную массу системы) на равных основаниях. Поэтому противопоставлять их друг другу в отношении их реальности нет оснований.

В каком же смысле релятивистские эффекты реальны? Чтобы ответить на этот вопрос, вернемся еще раз к последнему примеру. Очевидно, в системе быстрых сталкивающихся нуклонов имеется возможность образования новых частиц. Если относительная скорость нуклонов меньше определенного значения, то и возможность рождения частиц в системе отсутствует.

Образование новых частиц при столкновении быстрых нуклонов представляет собой процесс превращения поля системы быстрых частиц в новые частицы вещества. Изменение скорости движения заряженных частиц (а частиц, которые не обладали бы никаким «зарядом» — электрическим, ядерным или гравитационным, — в природе не существует) всегда связано с изменением их поля в любой данной системе.

Отличие этого понимания релятивистских эффектов от понимания Лоренца заключается в том, что первое согласуется с принципом относительности; оно основано на ином понимании самого поля. Для Лоренца поле есть состояние мирового неподвижного эфира. Здесь же поле рассматривается как особая форма материи, осуществляющая связь между частицами вещества через вакуум. Это поле, связывающее данную частицу с другими, по-разному проявляется в разных состояниях движения. Следовательно, изложенная концепция эффектов движения не исключает относительности, как это имело место в лоренцевой трактовке. С другой стороны, признание относительности проявления свойств частицы не исключает признания материальной природы этих проявлений, а вполне с ним согласуется.

Мы говорим о релятивистских эффектах в реальной, т. е. связанной, системе частиц. Но можно поставить вопрос: каковы параметры свободной частицы, не связанной полем с другими частицами?

В ряде случаев отношение движущегося тела к другим телам не имеет характера непосредственного взаимодействия. Например, в космической ракете, летящей со скоростью, близкой к световой, «восприятие» окружающего звездного мира иное, чем на Земле: в космической ракете звезды будут представляться сконцентрированными вблизи направления движения. Расстояния между звездами вдоль направления движения в системе отсчета, связанной

с ракетой, будут меньше, чем в системе отсчета, связанной с Землей или Солнцем. Это значит, что воздействия излучения, испускаемого звездами, на космическую ракету будут распределены неравномерно. Это также реальный эффект. Но из него нельзя делать никаких заключений о действительно неоднородном распределении звезд в мире, подобно тому как из астрономической аберрации нельзя делать заключения о собственном движении звезд. Речь идет только о характере воздействия встречного излучения на космическую ракету. Это воздействие и определяет «вид неба» в космической ракете.

Предположим теперь, что между движущейся частицей и базисом системы отсчета вообще нет взаимодействия. Что значит в этом случае «отношение» частицы к системе отсчета, чем определяется это отношение, чем оно устанавливается? Можно ли, например, считать, что рассматриваемое тело приобретает определенные значения параметров и по отношению к материальной системе, с которой тело не связано никаким взаимодействием?

Очевидно, в этом случае можно говорить лишь о *возможных* значениях параметров тела. Частица имеет бесконечное множество возможных значений массы или размера, и все эти значения *могут осуществляться* при возникновении соответствующих условий. Но осуществляются те или иные возможные значения массы, т. е. проявляют себя в тех или иных действиях, лишь в том случае, когда частица реально связывается с соответствующими материальными системами. Когда движущийся нуклон связывается с другим нуклоном в реальную систему, тогда за счет обоих нуклонов могут быть порождены новые, ранее не существовавшие частицы. Если же такая связь не возникает, то возможные значения массы ни в чем не сказываются. Эти величины могут быть полезны для промежуточных расчетов, но в действительности они не играют никакой роли. В природе реальное отношение, реальное сопоставление частицы с системой отсчета производится не человеком, оно совершается само по себе только в процессе *взаимодействия*. (

Таким образом, из бесконечного числа возможных значений параметров свободной частицы в каждый момент выделяются действительные, или эффективные, значения,

обусловленные тем, что частица в какой-то мере связана с теми или иными замкнутыми материальными системами.

Наконец, часто возникает вопрос: каковы параметры частицы, одновременно связанной с различными системами? Например, каковы параметры электрона, движущегося в молекуле, в свою очередь взаимодействующей с другими молекулами?

Из сказанного следует, что по отношению к разным практически замкнутым системам, с которыми *одновременно* связана данная частица, ее параметры принимают *различные* значения. Такое многообразие реальных значений параметров частицы в разных системах, с которыми она одновременно связана, обусловлено тем, что частица не является во всех этих системах абсолютно тождественной; собственное поле частицы в разных системах «действует» по-разному.

7. Подведем итоги. Пространственно-временная координация явлений в свете изложенного предстает как наиболее общее *физическое соотношение* между явлениями в материальном мире. Пространственно-временные соотношения отнюдь не являются изначальными, обуславливающими другие общие физические закономерности. Их можно с успехом вывести из динамических соотношений; если последние взять в качестве исходных. Нам представляется более правильным утверждение, что закономерности пространства и времени и наиболее общие динамические законы находятся в соответствии, что они представляют единую систему наиболее общих физических законов.

Специальная теория относительности показала, что в каждой замкнутой неускоренной системе осуществляется характерная для нее координация событий как в пространственном отношении, так и во временном. В этом смысле можно говорить об «индивидуальном пространстве и времени» для каждой инерциальной системы отсчета. Но при этом всегда следует учитывать лишь относительную замкнутость систем. Другими словами, специальная теория относительности исследует только локальные пространственно-временные закономерности.

Убедительное доказательство этого утверждения было дано общей теорией относительности.

§ 10. Общие идеи специальной теории относительности и диалектический материализм

1. Теория относительности послужила предметом многих философских исследований. Значительный интерес к ней со стороны философии объясняется тем, что теория относительности представляет этап революции в физике 20 века. Глубокое преобразование физических понятий о пространстве, времени, движении внесло много нового в физическую картину мира.

В чем заключалась ломка старых физических представлений о движении и взаимодействии, о пространстве и времени, произведенная теорией относительности? Прежде всего, в том, что она исключила из круга физических понятий представление о мировой механической среде, эфире, этой универсальной, всегда себе равной субстанции, игравшей в физике 19 века роль «первоматерии», основы механической картины мира. Вместо эфира теория относительности выдвинула на первый план понятие замкнутой вещественной системы (базиса инерциальной системы), частицы которой связаны полем, определяемым их взаимными положениями и скоростями движения относительно системы, причем пределом скоростей движения частицы (и любого материального образования в системе) является скорость передачи действия в поле (в вакууме).

Теория относительности показала, что такие общие свойства частиц вещества, как их размер, темп совершающихся в них процессов, масса, собственное поле, проявляются по-разному в зависимости от того, к какой системе частица относится, с какой системой она связана. Эти представления оказались новыми и необычными для физики. Что свойства объекта зависят не только от его структуры, но и от непосредственных внешних воздействий в том месте, где объект находится, это было известно задолго до теории относительности; но что свойства могут различно проявляться в зависимости от движения относительно системы, к которой объект относится, было впервые показано теорией относительности.

Изменение представлений о свойствах частиц и их проявлениях привело к возникновению нового понятия связанной системы. Система связанных полем частиц оказы-

вается не простым конгломератом, свойства которого аддитивно складываются из свойств компонент, а представляет самостоятельное целое, т. е. образует «частицу» нового типа. Масса системы частиц, притягиваемых друг к другу полем, меньше суммы масс отдельных частиц.

Теория относительности вносит новое в представление о поле. Она отнимает у поля тот абсолютный характер, который оно имело в классической физике. Распределение напряженностей поля зависит от движения заряженной частицы относительно той или иной системы, с которой она связывается. Поле выступает как материальная связь, осуществляющая соединение частиц в систему. В соответствии с новыми физическими представлениями о взаимодействии глубоко изменилось и физическое понимание механического движения.

По существу новое понятие движения начинает формулироваться в электронной теории. Движение заряженной частицы связано с изменением поля. Следовательно, перемещение заряженной частицы нельзя рассматривать как безразличный для нее перенос с места на место; инерциальное движение частицы с данной скоростью есть непрерывное воспроизведение того же состояния частицы в других частях системы, сопровождающееся ослаблением ее связей с одними частями и усилением связей с другими. Однако только в случае однородности материального окружения частицы и инерциальности ее движения собственное ее поле как бы воспроизводится при движении; можно сказать и наоборот, что точное воспроизведение внешних связей частицы со средой является условием ее инерциального движения. Такое движение возможно лишь в известном приближении.

В теории относительности коренным образом изменяются и законы движения. Новый закон сложения скоростей, наличие предела скорости в каждой замкнутой системе, предела, равного скорости передачи действий в вакууме от одной части системы к другой, — все это свидетельствует о сложности процесса перемещения.

В соответствии с новыми взглядами на движение и взаимодействие изменились в теории относительности и представления о пространстве и времени. Теория относительности отвергла метафизические понятия абсолютного

пространства и абсолютного времени как особых нематериальных сущностей. Она выработала взгляд на пространство и на время как на общие формы сосуществования и последовательности явлений, указала материальный базис для пространственно-временной координации и физический процесс, существенный для координации (в общем смысле слова). Она вскрыла зависимости длины и длительности от скорости движения в замкнутых системах.

Таковы те глубокие преобразования физических представлений о движении и взаимодействии, о пространстве и времени, которые дают основание рассматривать теорию относительности как этап революции в физике 20 века.

2. Новая физическая картина мира, возникающая на основе теории относительности при правильной трактовке последней, соответствует мировоззрению диалектического материализма.

В самом деле, марксистская философия отвергла представление метафизического (механистического) материализма о материи как конгломерате от века неизменных элементов, о движении как чистом переносе этих элементов с места на место, о движении, которое может быть и не связано с другими процессами, о пространстве и времени как независимых от материи вместилищах вещей и событий. Диалектический материализм представляет материальный мир как бесконечное многообразие качественно различных объектов, свойства которых не сводятся к свойствам их частей. Каждый качественно отличный тип объекта характеризуется специфической, типичной для него основной формой движения. Само существование материального объекта состоит в закономерном воспроизведении его внутренних и внешних связей. Пространство и время рассматриваются диалектическим материализмом как общие формы существования материи.

Таковы основные черты диалектико-материалистической картины мира, и общие физические представления, возникшие на основе теории относительности, находятся в соответствии с этим мировоззрением. Диалектический материализм сформировался до появления теории относительности. Он явился философским обобщением закономерностей, вскрытых в других областях явлений, преж-

де всего в общественной жизни, а затем и в живом мире. В этих областях явлений диалектический характер связей легче установить, нежели в мире неорганическом, где развитие протекает неизмеримо медленнее и поэтому гораздо труднее может быть раскрыто познанием. Самый же характер связей имеет много общего в различных областях явлений, ибо мир един. Поэтому марксизму и удалось выработать новое мировоззрение, в основе которого лежит идея изменчивой, саморазвивающейся материи; это мировоззрение затем развивалось и конкретизировалось в результате обобщения достижений других наук, в частности и физики.

Интересно проследить за тем, как новые идеи, близкие по своему философскому содержанию некоторым общим положениям современной физики, в частности теории относительности, задолго до ее открытия проникали в далекие от физики области науки, например в политическую экономию. Домарксова политическая экономия, пытаясь раскрыть законы экономических отношений, всегда брала в качестве исходного пункта некие общественные свойства изолированного человека, «робинзона», существующего на необитаемом острове. Считалось, что эта «свободная частица» общества обладает от века присущими ей свойствами — определенными экономическими потребностями, а также некоторым количеством товаров. Каким образом «робинзон» добывал свои товары, несущественно. Вступив в случайный контакт с другой «свободной частицей», таким же товаровладельцем, испытал, так сказать, экономическое «столкновение», неизменные «частицы» общества — люди — обменивают свои товары в определенных количественных отношениях. При систематическом обмене товарами, в котором принимает участие уже целый коллектив, эти отношения проявляются в форме определенных, стихийно устанавливающихся цен на каждый товар.

По мнению ряда экономистов 18 века (да и некоторых современных буржуазных экономистов), стоимость товара определяется только экономическими потребностями людей. В зависимости от того, сколько товаров доставляется для обмена, устанавливается их средняя цена. С этой точки зрения стоимость есть не что иное, как средняя

цена, и определяется она только отношением числа предлагаемых товаров к числу потребных товаров. Эта теория стоимости, усматривавшая сущность стоимости во внешних отношениях готовых товаров, вполне «описывала» отношения обмена в каждый данный момент и в данном месте, но не могла предсказать изменения стоимостей товаров, объяснить причины этих изменений и наличие определенных тенденций в изменениях стоимостей.

Классическая политическая экономия (А. Смит, Д. Рикардо) создала трудовую теорию стоимости, согласно которой стоимость товара определяется количеством труда, затраченного на его изготовление. Однако в этой теории труд, создающий стоимость, рассматривается как индивидуальный труд отдельного товаропроизводителя, как конкретный труд.

Совершенно иной подход к исследованию экономических отношений, новый метод был разработан марксизмом. Для Маркса и Энгельса общество — не конгломерат свободных людей — товаропроизводителей, с неизменными потребностями и взаимоотношениями. Общество — это целостная система, единый объект, внутренний строй которого представляет собой совокупность определенных, характерных для данного строя многообразных связей, в основе которых лежат в конечном счете производственные отношения. Последние обусловлены уровнем развития производительных сил всего общества. Общественные «свойства» каждой «частицы» общества — человека — не присущи ему от века, а обусловлены общественными отношениями в целом, тем местом, которое он занимает в общественном производстве и соответственно в распределении материальных благ.

В соответствии с этой новой картиной общественных явлений по-иному решаются и вопросы политической экономии, в частности вопрос о том, что такое стоимость товара. В марксистской политической экономии стоимость товара не определяется его внешними отношениями к другим товарам, возникающими при обмене; внешние меновые отношения зависят от отношений производства. Стоимость не определяется также количеством индивидуального, конкретного труда. Стоимость товара определяется *средним общественно-необходимым трудом*, затрачивае-

мым на его производство, следовательно, абстрактным трудом. Именно *относительное* количество абстрактного труда, затраченного на общественное производство товара и обусловленного производственными связями и уровнем производительных сил общества в целом, и определяет внешнее отношение данного товара к другому товару — «масштабу», т. е. цену товара, выраженную в деньгах. Такова, вкратце, марксова теория стоимости.

Сопоставляя марксову теорию стоимости с общими положениями теории относительности, изложенными выше, нетрудно обнаружить философскую общность идей, несмотря на крайнюю отдаленность этих различных областей явлений. И здесь и там отвергаются старые метафизические идеи об извечности свойств частицы, присущих ей «самой по себе». И здесь и там ряд параметров «частицы» зависит от ее отношения к системе в целом, от ее взаимодействий с другими частями системы. Эту общность идей можно проиллюстрировать на таком экономическом примере.

Представим себе две экономические системы, слабо связанные друг с другом посредством случайного обмена, не играющего существенной роли в экономике каждой из них, т. е. две «замкнутые» системы. Предположим, что уровень развития производительных сил в этих системах различен. Рассмотрим теперь следующий вопрос: какова стоимость товара, скажем автомобиля, произведенного в одной из этих систем и в результате случайного обмена переданного затем во вторую систему? Если бы уровень производительных сил в обеих системах был одинаков или если бы обе системы были тесно связаны путем регулярного обмена (т. е. составляли бы единую экономическую систему), стоимость автомобиля определялась бы средним общественно-необходимым трудом, *одинаковым* для обеих систем. Но в данном случае дело обстоит не так. Стоимость товара в той системе, где он произведен, и в той системе, куда он продан, различна. Мы говорим именно не о цене, а о стоимости, которая определяется долей среднего общественного труда, необходимой для его производства. Поскольку эта доля общественного труда в обеих «замкнутых» системах различна, то и стоимость товара будет разной. Если рассматривать не две замкнутые

системы, а множество их, то можно говорить и о многих *возможных* значениях стоимости товара в зависимости от того, в какую из этих замкнутых систем товар попадет.

Мы находим здесь аналогию с положениями теории относительности о таких свойствах тела, как его масса или размер. При переходе тела от одной замкнутой системы к другой, относительно которой его скорость (и соответственно собственное поле) имеет иное значение, меняются все его параметры, зависящие от отношения тела к системе, от того, какую «часть системы» представляет собой данное тело. Отношение тела к системе определяется его связями, взаимодействиями с другими телами системы.

Этот пример наглядно убеждает в том, что общие идеи теории относительности соответствуют мировоззрению диалектического материализма.

3. Было бы, однако, неверно думать, что изложенные здесь философские выводы из теории относительности самоочевидны, что они автоматически вытекают из основных положений этой теории. Это не так. Мы уже убедились, что существуют принципиально различные физические трактовки теории относительности. Очевидно, что диалектико-материалистические воззрения не могут быть связаны с любой из этих физических трактовок. Больше того, различное физическое понимание теории есть следствие различия в мировоззрении, различной философии.

Не удивительно поэтому, что сами творцы теории относительности (А. Эйнштейн, Г. Минковский и другие) иначе понимали общий физический смысл созданной ими теории. Они, как и подавляющее большинство естествоиспытателей того времени, не знали диалектического материализма. Даже те физики, которые серьезно интересовались философией и изучали ее, знали только два основных направления в философии: либо механистический материализм, либо разнovidности кантианства и позитивизма. Из последних в начале 20 века все большую популярность стал завоевывать махизм. В первой главе мы уже ознакомились с причинами распространения в науке субъективистских воззрений. Гносеологической причиной этого процесса было то, что все более вырисовывалась недостаточность и несостоятельность механической картины мира. Поэтому немало выдающихся физиков, знакомых

только с механистическим мировоззрением и отождествлявших его поэтому с материализмом вообще, подпали в той или иной мере под влияние махизма. Сам Эйнштейн в ранние годы своего творчества неоднократно подчеркивал, что по своему мировоззрению он близок к Маху. Естественно поэтому, что с позиции этого мировоззрения он истолковывал смысл ряда положений теории относительности.

Чтобы понять внутреннюю логику, которая ведет к субъективистским выводам из теории относительности, нужно воспроизвести общий ход рассуждений исследователя, не знающего диалектического материализма, а знакомого только с метафизическим материализмом и позитивизмом; нужно представить себе, какие выводы он может сделать из основных положений теории.

Универсальный мировой эфир был материальным «носителем» электромагнитного поля. Отказ теории относительности от эфира означал для многих физиков отказ от материальности поля. Это означало, что «материя исчезает, остаются одни уравнения»; другими словами, вместо объектов остаются только явления, последовательность которых в пространстве и времени и выражается в уравнениях. Предметом физики оказывается совокупность событий, которая подлежит описанию. Поле сводится к совокупности действий в «физическом пространстве», влияние которого сказывается в запаздывающем дальнодействии. В 1922 г. в своей книге «Теория относительности Эйнштейна и ее физические основы» М. Борн писал: «Свет или электромагнитные силы могут быть обнаружены всегда лишь в материи (Борн называет материей вещество.— *Р. Ш.*); пустое, совершенно свободное от материи пространство вообще не является предметом наблюдений. Можно установить лишь следующее: действие, исходящее от одного материального тела, проявляется спустя некоторое время на другом материальном теле. То, что происходит в промежутке между этими телами, может быть лишь предметом гипотез; это означает, что теория может произвольно (курсив мой,— *Р. Ш.*) предполагать в пустоте те или иные величины, характеризующие состояние поля и т. п., с одним только ограничением, что изменения, наблюдаемые в материальных телах, приводятся

благодаря этому в тесную и простую связь между собой». В сущности, на близкой точке зрения стоял в то время и Эйнштейн. Он рассматривал поле как определенный порядок следования явлений в пространстве и времени, согласно которому за определенными событиями в данном месте и в данный момент следуют определенные события в соседнем месте и в последующий момент. Такой устойчивый порядок Эйнштейн называет структурным законом. Поле, по Эйнштейну, и есть некий структурный закон, или определенный пространственно-временной порядок событий. Поле геометризировано, вернее, кинематизировано.

Таким образом, отказ от эфира привел к замене материального поля запаздывающим дальнодействием. Как и ньютоново дальнодействие, оно осуществляется через пустое пространство. Но в отличие от ньютонова абсолютного пространства, которому приписывались неизменные размеры от одной точки до другой, «релятивистская пустота» обладает размерами, зависящими от движения масштабов. Сказанное применимо и к временным промежуткам.

Мир в целом предстает как совокупность точечных событий, своеобразных «вспышек», которым сопоставляются четыре пространственно-временные переменные; «пространство-время» оказывается способом координации отдельных событий, удачно придуманным физиками. Общековариантные структурные законы дают единообразный способ описания хода событий.

Перед нами — иное понимание действительности, нежели понимание диалектического материализма. Картина мира, которую строили в связи с теорией относительности физики, подпавшие под влияние позитивизма, оказалась отличной от той картины, о которой мы говорили в начале этого параграфа. Позитивистская картина мира не усматривает в основе пространственно-временных отношений никаких материальных связей и взаимодействий; это — «чистые» отношения без объекта, их обуславливающего.

Сама наука выступает при этом как удобная схема установления количественных отношений между величинами, описывающими координату событий, а ее основные положения — как рецептура этих измерений. С этой точки зрения, например, эйнштейновский метод синхрони-

зации событий отличается лишь удобством. Все понятия и величины, которыми мы оперируем, — масса, энергия, импульс, скорость и другие — рассматриваются как параметры, введенные *нами*, как продукт человеческого сознания, и только. Но насколько полученные теорией соотношения между этими параметрами отражают объективные свойства мира, в частности пространства и времени, т. е. свойства, присущие им объективно, независимо от того, изучаем ли мы их или не изучаем? Этот вопрос, с точки зрения позитивиста, вообще не имеет смысла; он утверждает, что мы можем интересоваться только одним — не противоречат ли полученные результаты опытным фактам.

С точки зрения позитивизма понятие системы отсчета есть также условность: выбор той или иной системы отсчета есть операция такого же рода, как выбор декартовой или полярной системы координат в геометрии. Это лишь разные способы *описания* пространственно-временного хода событий.

Таким образом, «параметризация» мира считается позитивистом произвольной операцией теоретика. Только выводы теории должны «сойтись» с фактами. К чему может привести такой операционалистский подход к содержанию теории, видно из рассуждений Дингла, которые были изложены во введении. Мы используем скорость света для синхронизации движущихся часов. Но почему именно распространение света используется для этой цели? Потому, что это удобно, отвечает Дингл. Сопоставим теперь друг с другом показания часов движущихся (B) и неподвижных (A) (в некоторой инерциальной системе S). Могут ли часы B отстать от часов A при повторной их встрече, имеет ли место реальное замедление хода движущихся часов по сравнению с неподвижными? С точки зрения позитивиста Дингла, это невозможно. Ведь часы B отстают от часов A только потому, что *мы условились* определенным образом синхронизировать часы в разных местах. Но если отставание часов B есть результат только *соглашения*, то и часы A должны отставать от часов B в силу того же соглашения. Ведь движение A и B относительно. Поэтому в нашем примере должен получиться такой результат: 1) часы B , удалившись от A на некоторое расстояние,

отстают по сравнению с часами, пребывающими *неподвижно* в системе S ; часы A , в свою очередь, отстают от часов, неподвижных в системе S' ; 2) пусть затем часы B начали двигаться обратно к A ; значит, мы их «переставили» в другую инерциальную систему S'' (так же, как и часы A , находящиеся теперь в системе S'''), и поэтому мы должны их снова синхронизировать; когда часы снова встретятся, то окажется, что никакого отставания часов B от часов A нет. Ибо синхронизация часов по определенному способу придумана нами.

Но если следовать этой логике, то и изменение массы частицы со скоростью есть также результат определенного способа описания явлений движения, причем это описание основано на лоренцевых уравниваниях преобразования, полученных на основании соглашения. Почему же ускорение частиц является необходимым условием для генерации новых частиц, зачем вообще нужны ускорители, если релятивистское изменение массы есть всего лишь результат условной процедуры измерения этой величины?

Развитие науки опровергает позитивистскую концепцию познания. Способ синхронизации разноместных событий, предложенный Эйнштейном, не просто удобен, он отражает объективную временную связь событий. Если мы захотим синхронизировать события произвольным способом, противоречащим эйнштейновскому, например, при помощи сигнала, скорость которого непостоянна, то мы рискуем получить такие неприятные следствия, как «самопроизвольное» изменение частоты фотона при распространении его в вакууме, т. е. нарушение закона сохранения энергии. Можно, конечно, придумать новые величины, которые компенсировали бы несохранение энергии, обусловленное придуманным нами же своеобразным способом синхронизации. Но построенная при помощи такого набора произвольных величин картина мира окажется намного запутаннее, чем птолемеяевская картина движения планет, обращающихся по эпициклам и дифферентам. На основе теории, пользующейся произвольной системой параметров, невозможно что-либо предвидеть. Действительный путь формирования и развития физических понятий и теорий ничего общего не имеет с позитивистской схемой.

Мы видим, как субъективистские представления могут возникать в ходе прогресса физики в том случае, если рассматривать вновь открытые законы изолированно от всей совокупности наших знаний об объекте и если забыть про самый объект. Тогда пространственно-временные отношения отрываются от реального взаимодействия, от поля, определяющего эти отношения.

Поэтому Ленин, который впервые подверг анализу философские воззрения физиков начала 20 века с позиций диалектического материализма, назвал этот этап в развитии физической картины мира кризисом. По Ленину, «...*суть* кризиса современной физики состоит в ломке старых законов и основных принципов, в отбрасывании объективной реальности вне сознания, т. е. в замене материализма идеализмом и агностицизмом. «Материя исчезла» — так можно выразить основное и типичное по отношению ко многим частным вопросам затруднение, создавшее этот кризис»¹⁾.

Иногда задают вопрос: если Эйнштейн в свое время был близок к махизму, то выходит, что позитивистские убеждения не помешали ему создать теорию относительности; наоборот, можно предположить, что позитивизм может содействовать крупным физическим открытиям. Такое заключение ошибочно. Неверная картина мира, отражающая его не как единое целое, а как набор событий, упорядочиваемых познающим человеком, не может вести науку вперед. Физические открытия Эйнштейна отнюдь не явились результатом махистских философских взглядов, которых он в известной мере придерживался. Дело в том, что Эйнштейн, как и многие другие крупные физики, вовсе не занимал последовательную позицию в философии; при формулировке тех или иных физических положений он подчас «забывает» свои идеалистические высказывания. Последовательных идеалистов среди творчески работающих ученых вообще не бывает и не может быть, так как идеализм есть искажение действительности. Строго последовательный субъективный идеализм, как говорил Ленин, есть соллипсизм, несовместимый ни с

¹⁾ В. И. Ленин, Сочинения, т. 14, Госполитиздат, 1947, стр. 245.

какой наукой. Даже Мах не был «последовательным махистом». Тем более это относится к Эйнштейну.

В действительности исходные положения, которые привели Эйнштейна к созданию теории относительности, заключают в себе идею об относительности действий поля. Именно с этого он начинает свою работу 1905 г. «К электродинамике движущихся сред», именно эта идея привела его к отказу от эфира, а она была правильной и революционной идеей; она не имела ничего общего с маховским отрицанием поля вообще. Обобщение принципа относительности Галилея на все физические явления в инерциальных системах и принцип постоянства скорости света в таких системах — идеи, которые привели Эйнштейна к отказу от понятий абсолютного пространства и времени и к формулировке новых понятий пространства и времени, — на самом деле глубже и точнее отражали природу вещей, нежели представления классической физики, и, следовательно, были глубоко материалистическими¹⁾. Они не имели ничего общего с идеями Маха; известно, что Мах был решительным противником теории относительности. Но трактовка Эйнштейном созданной им теории, то истолкование, которое он ей затем дал, были в ряде пунктов односторонними; это-то и привело его к такому неверному выводу из теории относительности, как релятивизация ускорения, что было физической ошибкой; к длительным попыткам геометризовать поле, создать формальную, геометрическую единую теорию поля, которые оказались бесплодными, что неоднократно признавалось самим Эйнштейном. Развитие физического учения о пространстве и времени пошло по другому пути.

¹⁾ Я должен отметить, что в моей ранее опубликованной работе «За материалистическую теорию быстрых движений» (сб. «Философские вопросы современной физики», Изд-во АН СССР, М., 1952) была дана односторонняя философская оценка этой основной работы Эйнштейна по теории относительности.

ГЛАВА III

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КОСМОЛОГИИ

§ 11. Пространство и время в ускоренной системе отсчета

1. Базис любой системы отсчета испытывает различные воздействия со стороны других материальных систем; поэтому любая система отсчета может рассматриваться как неускоренная лишь для ограниченной области явлений. Вопрос о том, какими являются пространственно-временные соотношения в ускоренно движущейся системе отсчета, был поставлен вскоре после создания специальной теории относительности; этот вопрос вызывает особый интерес в настоящее время в связи с проблемой космических путешествий.

В классической физике неинерциальные системы отсчета считались просто «неудобными» для определения пространственных и временных отношений, поскольку при пользовании ими приходится учитывать «кажущиеся» силы и ускорения (центробежные и кориолисовы), порождаемые ускоренным движением самой системы отсчета. Пространственные же расстояния и промежутки времени в классической физике рассматривались как инвариантные величины, вообще не зависящие от какой бы то ни было системы отсчета, имеющие реальный физический смысл сами по себе. Но в теории относительности системы отсчета играют иную роль, только по отношению к ним приобретает полную определенность пространственно-временная координата явлений. Как же влияет на координату явлений ускорение системы отсчета? Во многих руководствах по теории относительности вопрос ставится

так: каковы пространственно-временные соотношения в произвольно движущейся системе отсчета?

Выше уже были изложены соображения, показывающие, что последний вопрос поставлен неправильно; это было убедительно показано В. А. Фоком. Произвольно движущаяся материальная система не может служить базисом системы отсчета потому, что ее части испытывают различные деформации и поэтому система тел не является квазитвердой, а входящие в нее тела не могут служить масштабами расстояний. Часы в произвольно движущихся системах не могут быть синхронизированы, в них вообще не могут совершаться строго периодические процессы. Поэтому координация событий относительно такой системы в общем случае невозможна. Условием, определяющим пригодность материального тела в качестве базиса системы отсчета, является сохранение им «физического подобия». Это означает, что части материальной системы — базиса не должны испытывать при ускоренном движении различных деформаций, а «часы» в разных местах должны быть в каждый (хотя бы малый) промежуток времени синхронизированы в эйнштейновском смысле¹⁾. Для того чтобы физическое подобие имело место и при ускорении системы, необходимо, чтобы материальная система находилась в практически однородном силовом поле. ¹

Для космического корабля указанное условие может быть реализовано только приближенно; импульсы, сообщаемые ему ускорение, неизбежно вызывают неодинаковые деформации его частей и нарушают периодичность процессов в различных его частях. Но если эти импульсы малы и ускорение невелико (например, порядка g — ускорения силы тяжести), то можно принять, что корабль приближенно сохраняет физическое подобие. Наиболее простым случаем является так называемое гиперболическое движение тела, при котором оно движется в сопутствующей ему в каждый данный момент инерциальной системе отсчета с постоянным ускорением. Этот случай может быть осуществлен в ракете, ускоряемой одинаковыми малыми импульсами через равные промежутки времени (в сопут-

¹⁾ Л. Яноши называет такое ускорение системы адиабатическим,

ствующей системе отсчета), причем во всей системе каждый раз успевает установиться новое состояние инерциального движения. В исходной инерциальной системе отсчета S , из которой стартует космический корабль, ускорение корабля, разумеется, не постоянно, а уменьшается со временем, по мере приближения скорости космического корабля к скорости света. Кроме того, в исходной системе отсчета S ускорение происходит *не одновременно* во всем корабле, а последовательно как бы распространяется по кораблю со скоростью c^2/v . Можно образно сказать, что по кораблю распространяется «волна ускорения», идущая по нему со скоростью c^2/v .

2. Как же будут изменяться временные и пространственные соотношения в системе, ускоряющейся как целое, т. е. движущейся в постоянном силовом поле? Чтобы ответить на этот вопрос, следует принять во внимание, что в течение очень малого промежутка времени система может рассматриваться как инерциальная; другими словами, можно представить себе, что система совершает последовательный ряд инерциальных движений со скоростями, отличающимися друг от друга на бесконечно малое значение dv . При этом переход от скорости v к скорости $v+dv$ совершается во всей ускоряемой материальной системе мгновенно¹⁾. Предполагается также, что после каждого перехода материальной системы от скорости v к $v+dv$ «моментально» происходит «пересинхронизация» часов системы относительно исходной системы отсчета S . Только при этих условиях материальная система может быть базисом последовательности инерциальных систем отсчета. Заметим, что в каждом новом состоянии движения со скоростью v местная (локальная) скорость света равна c , поскольку для малых отрезков времени и проходимых путей сопутствующую систему можно считать инерциальной.

При указанных выше допущениях к каждому «дифференциальному» состоянию инерциального движения применимы лоренцевы преобразования, которые (для рассматриваемого частного случая одномерного движения)

¹⁾ Ср. E. M. McMillan, The «clock paradox» and space travel, Science 126, 3270, 1957.

можно написать в виде

$$x' = (\gamma + d\gamma) [x - (v + dv) t],$$

$$t' = (\gamma + d\gamma) \left[t - \frac{v + dv}{c^2} x \right],$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

В сопутствовавшей кораблю системе отсчета S' , движущейся относительно S со скоростью v , ускорение корабля равно не $\frac{dv}{dt}$, как в системе отсчета S , а постоянной величине $\frac{du}{dt'} = a$, где du — прирост скорости корабля относительно S' . Поэтому в системе отсчета S' изменение показаний часов в точке x' при ускорении корабля равно — $x' \frac{du}{c^2}$, или — $\frac{ax' dt'}{c^2}$.

Соответственно происходит и последовательное изменение расстояний (лоренцево сокращение) корабля относительно системы отсчета S в направлении движения. Величина этого сокращения $dl = -\frac{\gamma^2 l v dv}{c^2}$ может быть получена путем расчета времени, необходимого для прохождения «волны ускорения», распространяющейся вдоль корабля со скоростью c^2/v , и умножения этого промежутка времени на величину изменения скорости корабля dv ¹⁾. Лоренцево сокращение можно наглядно представить себе как результат того, что корма космического корабля в течение промежутка времени, за которое по кораблю проходит «волна ускорения», приближается со скоростью dv к носовому краю корабля.

Как уже было сказано, «местная» скорость света (в каждой точке) равна c . Однако, если сопоставить ско-

¹⁾ Время, за которое по системе проходит «волна ускорения» на расстояние l , равно $\frac{l}{\left(\frac{c^2}{v} - v\right)}$. Умножая эту величину на dv , получим

написанное выражение для dl . То обстоятельство, что скорость «волны ускорения» больше скорости света, не противоречит теории относительности, так как эта волна не переносит энергию вдоль корабля.

рость света в различных частях ускоренной системы отсчета, она уже не будет везде одинаковой величиной, поскольку базис системы отсчета меняет свою скорость за время прохождения светового луча по нему. Скорость света в ускоренно движущейся системе оказывается функцией как величины ускорения, так и координаты пространства; в случае гиперболического движения ускоренной системы отсчета скорость света можно приближенно выразить формулой $c\left(1 + \frac{ax'}{c^2}\right)$.

В изложенных соображениях не был дан анализ реальных физических явлений, совершающихся на космическом корабле в процессе его ускорения. В действительности изменение скорости корабля не совершается мгновенно; реальная волна ускорения передается по кораблю с конечной скоростью, значительно меньшей скорости света. Теория относительности вообще не рассматривает процесса установления новых пространственно-временных отношений при ускорении. Мы лишь сопоставили — на основе специальной теории относительности — последовательные установившиеся состояния инерциального движения космического тела и рассмотрели, как будет меняться координация событий в результате медленного ускорения системы отсчета. Такое рассмотрение позволяет сделать некоторые выводы о пространственно-временных закономерностях в ускоренных системах отсчета.

3. В медленно ускоряющихся системах можно для простейших случаев установить некоторые характерные для них особенности пространственно-временной координации событий. Собственное время в ускоренной поступательно движущейся системе течет медленнее, чем в инерциальной системе отсчета, из которой происходит старт. Поэтому на возвратившемся из космического путешествия корабле истекшее время будет меньше, чем в системе отсчета, из которой этот корабль стартовал. Отсюда следует вывод, что имеется принципиальная возможность влиять на ход «локального времени». Это означает, что, управляя движением космического корабля (при условии, если скорость корабля будет порядка скорости света), можно добиться искусственного замедления темпов всех происходящих на корабле процессов,

Чем же объясняется факт замедления времени в ускоренной системе отсчета? Авторы некоторых работ подчеркивают, что ускорение несущественно для факта замедления. Однако нетрудно видеть, что если игнорировать наличие ускорения одной из систем, то никакого реального, однозначного замедления времени в системе S' нельзя получить, поскольку скорость обеих систем относительна и расчет замедления времени можно произвести тем же способом и для системы S . В действительности ускорение имеет решающее значение для замедления времени именно в системе S' , ибо только вследствие ускорения системы в ней происходит пересинхронизация часов по отношению к S , которая не имеет места в системе S по отношению к S' . Одновременно совершается изменение и остальных общих параметров (длин, масс) в ускоренной системе. При учете ускорения симметрия обеих систем, S и S' , исчезает, ибо реальное воздействие, связанное с конечной затратой энергии, совершается над базисом системы S' . Если принять, что здесь также имеет место обратимость и можно относить ускорение к системе S , то с таким же основанием можно это ускорение относить без исключения ко всем инерциальным системам, т. е. ко всему миру, что физически бессмысленно, ибо для ускорения базиса системы S' была затрачена конечная энергия. Поэтому только в S' может происходить «перестройка», и в том числе пересинхронизация часов.

Таким образом, ускорение *абсолютно* в том смысле, что оно относится всегда только к *данному* телу, в котором изменяется состояние движения. Это не означает, однако, что Ньютон был прав, усматривая в ускорении проявление абсолютного пространства и времени, поскольку оно относится к телу самому по себе; ибо величина ускорения *относительна*, она различна в разных инерциальных системах отсчета, и поэтому может идти речь лишь об ускорении тела по отношению к той или иной инерциальной системе.

Из сказанного выше следует ограниченность области явлений, для которых S' может служить системой отсчета. Расстояние $x' = c^2/a$ является предельным для пространственной области, которая может быть отнесена к ускоренной системе S' .

Рассмотрим еще случай равномерно вращающейся системы отсчета. Выражение интервала в такой системе (в цилиндрических координатах) имеет вид ¹⁾ $ds^2 = (c^2 - \omega^2 r^2) dt^2 - 2\omega r^2 d\varphi dt - dz^2 - r^2 d\varphi^2 - dr^2$ (r — расстояние от оси системы отсчета, вокруг которой происходит вращение, ω — угловая скорость, φ — полярный угол). Из этого выражения сразу видно, что ход времени различен на разных расстояниях r от оси вращения, поскольку коэффициент при dt^2 равен не c^2 , а $c^2 - \omega^2 r^2$ и, кроме того, в интервале имеется смешанный член, содержащий произведение $r^2 d\varphi dt$.

Вследствие этого однозначная синхронизация часов эйнштейновским способом вдоль замкнутой кривой — даже в сравнительно небольшой области пространства — невозможна (если, конечно, нельзя пренебречь самим вращением системы отсчета); в результате обхода кривой получается разность времени, равная (при малой скорости вращения системы отсчета и если $\omega r \ll c$) $\Delta t = \pm \frac{2\omega S}{c^2}$, где S — площадь, охватываемая контуром (знак зависит от того, обходится ли контур по направлению вращения или против него). В этом отношении вращающаяся система отсчета отличается от поступательно движущейся ускоренной системы, в которой возможно согласование хода часов во всей области.

В неинерциальных системах отсчета, следовательно, усложняется кинематика. В частности, в равномерно вращающейся системе отсчета эффективная скорость света, определенная через отношение l/t , равна $c \pm \frac{2\omega S}{l}$.

Такие опыты действительно были произведены, и они подтвердили этот результат (опыты Саньяка и Майкельсона — Гэля). В этих опытах была подтверждена написанная выше формула для скорости света в равномерно вращающейся (с малой угловой скоростью) системе отсчета.

В случае вращающейся системы отсчета становится особенно наглядной ограниченность области явлений, которые могут быть отнесены к такой системе. Очевидно,

¹⁾ Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Теория поля, § 90, Физматгиз, М.—Л., 1960.

что для расстояний от оси вращения, равных или превосходящих c/ω , эта система отсчета заведомо непригодна, поскольку на таких расстояниях скорости тел в этой системе становятся равными или большими скорости света.

В ускоренных системах отсчета динамические закономерности существенно отличаются от соответствующих закономерностей в замкнутых неускоренных системах отсчета. В ускоренной системе всегда приходится учитывать силы инерции, обусловленные ускорением самой системы. Применение ускоренных систем, следовательно, вносит усложнения в выражения физических законов. Однако анализ пространственно-временных отношений в медленно ускоряющейся системе отсчета представляет интерес в том отношении, что он позволяет продвинуться дальше в познании свойств пространства и времени. Дело в том, что медленное ускорение системы отсчета можно представить как происходящее в однородном силовом поле, характеризуемом потенциалом $U(r)$, и это оказывается принципиально важным.

4. Из приведенных выше соображений можно заключить, что в однородном силовом поле собственное время в разных точках поля, характеризуемых различными значениями потенциала, течет по-разному, в зависимости от разности потенциалов U . В самом деле, в рассмотренном выше примере гиперболическое движение космического корабля как бы совершается под действием постоянного силового поля, потенциал которого U может быть записан в виде $U = -ax'$. Соответственно изменение хода собственного времени в движущейся системе при переходе ее из точки $x' = 0$ с потенциалом $U = 0$ в точку x' с потенциалом U пропорционально U/c^2 .

В нашем примере реальное силовое поле описанного типа отсутствует. Но ясно, что поле, характеризуемое потенциалом аналогичного типа, вообще должно отличаться тем, что оно одинаково для тела любой природы, независимо от его структуры и массы; это следует из того обстоятельства, что выражение потенциала в данном случае не содержит заряда тела. Другими словами, необходимо, чтобы все тела двигались с *одинаковым ускорением* в данном поле.

Но таким полем нельзя считать ни электромагнитное, ни ядерное поле, так как их действие зависит от заряда тела и вообще различно для разных тел. В природе есть только единственное поле, при свободном движении в котором достаточно малое тело не испытывает деформации и которое сообщает всем телам одинаковое ускорение (при данной напряженности), — это поле тяготения. Поэтому анализ пространственно-временных соотношений в ускоренных системах отсчета дает возможность по аналогии найти закономерности пространства-времени в поле тяготения, т. е. влияние на пространственно-временные соотношения материальных масс. Это и было выполнено Эйнштейном с помощью *принципа эквивалентности*.

§ 12. Пространство, время, тяготение

1. Природа тяготения в течение двух веков не была предметом исследования физики. Правда, еще в 18 веке возникла идея о конечной скорости распространения гравитации (т. е. о том, что тяготение есть поле), обсуждавшаяся в течение длительного времени. Однако после возражений Лапласа и ряда неудачных попыток определить конечную скорость тяготения эта мысль была оставлена. В конце 19 века она была снова выдвинута Гербером, который предположил, что скорость передачи тяготения равна скорости света. Гипотеза Гербера также не нашла отклика. Только после создания теории относительности проблема тяготения была снова поставлена Пуанкаре, а затем Эйнштейном.

Если тяготение передается с конечной скоростью — а это положение с необходимостью следует из специальной теории относительности, исключающей любые мгновенные взаимодействия, — то силы тяготения должны зависеть не только от расстояний между телами, но и от относительных скоростей тел (точнее, от отношения v/c); такой вывод был сделан Пуанкаре¹⁾. Однако это было лишь частное заключение. Поскольку мы рассматриваем действия тяготения как процесс, совершающийся во всей

¹⁾ А. Пуанкаре, О динамике электрона, Сб. «Принципы относительности», ОНТИ, 1935.

области пространства, в которой находятся взаимодействующие тела, значит, тяготение есть *поле*, связанное с источниками — телами — и определяемое их массами; масса играет здесь такую же роль, как электрический заряд в электромагнитном поле. Следовательно, в основу теории должны быть положены не те или иные выражения для сил, действующих на тела, а уравнения поля тяготения, подобно тому как в основу электродинамики положены уравнения электромагнитного поля (Максвелла — Лоренца). В простейшем предельном случае, когда можно пренебречь скоростями взаимодействующих тел и рассматривать задачу статически, уравнения поля тяготения должны перейти в уравнение Пуассона, связывающее потенциал статического поля тяготения ϕ с распределением масс (точнее, их плотности ρ): $\Delta\phi = -4\pi\chi\rho$ и в уравнение движения материальной точки (центра тяжести тела) под действием статического поля: $\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\text{grad } \phi$. Каким же способом найти специфические закономерности поля тяготения?

Рассмотрим прежде всего отличительные свойства гравитационного поля. Опыты Ньютона, Этвеша и других, произведенные над макроскопическими телами, показывают, что источниками гравитационного поля служат любые тела, обладающие массой; с другой стороны, поле тяготения действует на любое тело пропорционально его массе m_i (инертной массе), равной величине массы-заряда m_g (тяжелой массы). Эту особенность выражают словами: масса тяжелая (или гравитационный заряд) равна массе инертной, определяющей ускорение тела. Равенство тяжелой и инертной масс проявляется в том, что все тела в поле тяжести движутся с одинаковыми ускорениями. Этот факт был тщательно проверен.

Путь, который избрал Эйнштейн¹⁾ для установления уравнений тяготения, основан на аналогии между действиями тяготения и результатом, который получается при рассмотрении движений тел в ускоренной системе отсчета; в ускоренной системе все тела будут двигаться

¹⁾ См. А. Эйнштейн, Общая теория относительности, Сб. «Принцип относительности», ОНТИ, 1935.

с противоположно направленным ускорением, притом одинаковым для всех тел. Этот факт выражают так: все тела в ускоренной системе отсчета движутся с одинаковым ускорением под действием сил инерции, пропорциональных их массам. Это движение, говорит Эйнштейн, ничем не отличается от движения в соответствующем однородном поле тяготения. Он приводит пример с лифтом. Если лифт ускоренно двигать вверх, то тела в лифте будут двигаться так, как будто ускорение силы тяжести увеличилось. Если лифт свободно падает, то сила инерции уничтожает действие тяготения и по отношению к лифту тела движутся только по инерции. Положение об одинаковости и физической неразличимости сил инерции, обусловленных ускоренным движением системы отсчета, и поля тяготения Эйнштейн назвал *принципом эквивалентности*.

2. Основываясь на принципе эквивалентности сил инерции и поля тяготения, Эйнштейн сформулировал законы этого поля.

Ход рассуждений Эйнштейна таков.

Поле тяготения и поле сил инерции физически неразличимы. Значит, действие поля тяготения должно сказываться так же, как и действие ускорения системы отсчета. Последнее же сказывается в характере геометрии, или, определеннее, в особенностях метрики пространства-времени.

Величины g_{ik} , связывающие интервал с дифференциалами координат, и являются, по Эйнштейну, величинами, характеризующими поле тяготения, или его потенциалами. Гравитационное поле должно определяться зависимостью его потенциалов g_{ik} от координат.

Эйнштейн использовал принцип эквивалентности полей тяготения и сил инерции, чтобы найти, в чем именно проявляются гравитационные поля. Однако аналогия между полем тяготения и силами инерции может быть проведена лишь для ограниченной области пространства и времени, строго говоря, только для бесконечно малой области пространства-времени. В самом деле, невозможно подобрать такую систему отсчета, которая везде и всегда имитировала бы поле тяготения тела, например Солнца или Земли. Поле тяготения определяется распределением

масс. Если Землю рассматривать как точечную массу, то поле тяготения Земли было бы центрально-симметричным, одинаково убывающим с расстоянием во все стороны. Никакая ускоренная система координат — будь то поступательно движущаяся или вращающаяся — не может «создать» такого поля тяготения. Только для бесконечно малой области пространства и времени можно «подобрать» равноценную ускоренную систему («лифт»), которая имитировала бы действие тяготения; такое поле тяготения должно медленно изменяться, оно должно быть однородным во всей области тела. Аналогичных ускоренных систем нельзя «подобрать»; например, вращающиеся системы вообще не могут создать полей, похожих на поле тяготения, поскольку они «сообщают» тем большее ускорение, чем дальше расположено тело от начала системы. Другими словами, принцип эквивалентности имеет сугубо локальное применение и играет лишь эвристическую роль.

Это обстоятельство сказывается на особенностях метрики пространства-времени, или геометрии, обусловленных полем сил инерции, в отличие от поля тяготения. В случае поля сил инерции путем изменения выбранной системы отсчета можно снова перейти к «плоской» геометрии, т. е. снова перейти к инерциальной системе отсчета. В действительных же полях тяготения геометрию невозможно сделать псевдоевклидовой, или плоской, как бы мы ни выбирали системы отсчета. Этому препятствует распределение масс. Только в малых областях пространства и для малых промежутков времени можно перейти к инерциальной системе отсчета. Такой инерциальной системой отсчета (для явлений, совершившихся в ней) был бы свободно падающий лифт. Но такой лифт весьма невелик по размерам и может падать лишь в течение небольшого промежутка времени.

Итак, Эйнштейн пришел к заключению, что поле тяготения проявляется в характере связи пространственных и временных величин, или, короче, в метрике пространства-времени, или, еще иначе, в характере геометрии пространства и времени.)

Однако мы не знаем в точности, говорит Эйнштейн, что именно в данной метрике обуславливают массы, а что —

ускорение тела по отношению к другим телам; другими словами, мы не можем разделить влияние «собственно» поля тяготения и поля сил инерции. Нельзя ли найти такую ковариантную по отношению к любым системам отсчета, т. е. выражающуюся в одинаковой форме в любой системе, характеристику поля тяготения, которая определялась бы свойствами источников этого поля? После упорных поисков Эйнштейн предложил в качестве такой характеристики величину, определяющую так называемую кривизну пространства-времени, — тензор кривизны, названный так по аналогии с величиной, характеризующей свойства обычных двумерных поверхностей. Уравнение поверхности, скажем сферы, в разных системах координат выражается различными способами. Однако кривизна поверхности будет выражаться одними и теми же числами независимо от выбора координат; кривизна сферы есть величина, равная обратному радиусу ($1/r$).

Точно так же и величины g_{ik} — потенциалы тяготения — в разных системах отсчета вообще будут различными функциями координат пространства и времени. Но некоторая тензорная величина, аналогичная кривизне в теории поверхностей, выраженная через g_{ik} и их производные по координатам, характеризует метрику пространства-времени (проще говоря, кинематику) независимо от выбора систем отсчета.

Важнейшее предположение, сделанное Эйнштейном, заключается в том, что тензор кривизны R_{ik} , характеризующий метрику пространства-времени и, следовательно, поле тяготения, пропорционален тензору энергии-импульса T_{ik} , определяемому распределением и движением материи — источников поля тяготения. Это соотношение, по предположению Эйнштейна, и есть общее уравнение поля тяготения, обобщающее уравнение Пуассона. Оно записывается так:

$$R_{ik} = -\kappa \left(T_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} T \right).$$

Это обобщение заключается в том, что поле тяготения создается любыми массами, в частности и той долей массы, которая обусловлена движением тел и зависит от их кинетической энергии.

3. Таким образом, тяготение, по Эйнштейну, есть особое поле, создаваемое объектами любой природы в соответствии с их массой и заключающееся в том, что тензор массы обуславливает вокруг данного объекта определенную геометрию пространства-времени. Геометрия эта не евклидова, а риманова. Так оправдалось предсказание Н. И. Лобачевского, что вопрос об истинной геометрии может решить только физический опыт. Отклонение действительной геометрии от евклидовой, «плоской», проявляется в особенностях мировых линий, т. е. в особенностях движения материальных точек и распространения световых лучей вблизи масс.

В первом приближении пространственно-временной интервал вблизи данной массы будет иметь вид $ds^2 = (c^2 - 2U)dt^2 - (1 + \frac{2U}{c^2})dr^2$, где U — ньютонов потенциал тяготения. Следует заметить, что путем применения принципа эквивалентности тяготения и сил инерции Эйнштейн сначала получил для интервала менее точную формулу (именно $ds^2 = (c^2 - 2U)dt^2 - dr^2$); уточненная формула для ds^2 получается в качестве приближения из эйнштейновского уравнения тяготения. Из выражения интервала вытекает, что тяготение проявляется не только в разном ходе времени в разных точках поля, но и в различии расстояний, разделяющих данные события в различных местах поля. Квазитвердое тело, свободно движущееся в поле тяготения, для достаточно малой области явлений может служить базисом инерциальной системы отсчета. Но при перемещении в поле тяготения на конечное расстояние в течение конечного промежутка времени квазитвердое состояние тела уже не сохраняется; части тела, движущегося в поле тяготения, в общем случае не могут оставаться неподвижными друг относительно друга. Тело становится, по выражению Эддингтона, «моллюскообразным» (хотя величина деформации мала). В поле тяготения вообще невозможна также и точная синхронизация часов во всем пространстве; ход времени вообще различен в разных местах.

Из сказанного следует, что в общем случае с системой тяготеющих тел невозможно связать единую систему отсчета; это всегда возможно только для бесконечно малой

части материальной системы. В зависимости от конкретных условий и требуемой точности эксперимента эта «бесконечно малая» часть системы тел может иметь размеры от метров до миллионов километров¹⁾.

Только в статическом поле тяготения (а статическое поле можно приписать только изолированному телу) может существовать «мировая» система отсчета, в которой показания часов могут быть приведены в соответствие во всем пространстве, где поле существует («мировое время»); однако локальное время и здесь будет различно в разных точках поля. Различны также и расстояния между концами одинакового стержня в разных областях пространства.

Таким образом, «мировая» система в целом деформирована, «моллюскообразна», в нестатическом поле она вообще невозможна. В поле тяготения, как уже было отмечено, свободные частицы будут двигаться по геодезическим кривым, отличным от мировых линий псевдоевклидовой геометрии. В характере инерциального движения в поле тяготения, а также в «моллюскообразности» «мировой» системы отсчета в статическом поле и проявляется кривизна пространства-времени.)

Заметим, что изменение хода местного времени, равно как и изменение размеров и формы тела в обычных полях тяготения очень мало; это видно из данных, приводимых ниже для тел, движущихся в поле тяготения Солнца. Другими словами, величина U обычно очень мала по сравнению с c^2 . Это, конечно, несколько не умаляет принципиальных результатов теории тяготения Эйнштейна, но объясняет трудности ее экспериментальной проверки.

4. Рассмотрим, к каким результатам приводит теория тяготения Эйнштейна при решении задачи о движении планет вокруг Солнца. Движения планет в поле тяготения Солнца являются свободными движениями материальных точек; именно то обстоятельство, что они движутся не по прямым линиям и не равномерно, как уже сказано, свидетельствует о неевклидовом характере

¹⁾ Например, в недавних опытах по красному смещению линий гамма-спектров в поле тяготения влияние последнего проявляется уже на расстояниях в десятки метров; об этих опытах см. ниже,

геометрии. С точки зрения полевой теории тяготения движение планеты определяется не мгновенными силами притяжения Солнца и других планет, расположенных от данной планеты на определенных расстояниях (и «начальными» условиями движения планеты), а действием поля в каждой точке, через которую проходит планета в данный момент. Это поле определяется, во-первых, не только расстояниями до Солнца и других планет, но и скоростями этих планет, и, во-вторых, оно зависит от положений и скорости источников поля не в данный момент t , а в предшествующие моменты $t' = t - \frac{r_i}{c}$, так как на задачу действия в поле требуется конечное время r_i/c (r_i — расстояние от данной планеты до i -го тела солнечной системы).

Такое различие между полевой теорией тяготения и ньютоновой в понимании характера взаимодействия должно привести к некоторому количественному расхождению в результатах, полученных на основе обычной небесной механики и теории Эйнштейна. Это расхождение очень мало по величине. Оно сводится к тому, что по теории Эйнштейна орбита планеты, движущейся в центрально-симметричном поле, должна очень медленно поворачиваться в своей плоскости. Для Меркурия, который находится ближе к Солнцу и обращается быстрее, чем другие планеты, дополнительное смещение перигелия орбиты составляет 43" в столетие.¹

Другим подтверждением полевой теории тяготения может служить отклонение светового луча при прохождении вблизи больших масс, например вблизи Солнца. В поле тяготения световой луч распространяется не по прямой, а по геодезической линии, и в этом факте также сказывается неевклидов характер метрики (пространства-времени). Такое отклонение луча можно обнаружить при затмениях Солнца, когда лучи от звезд, которые при евклидовой геометрии должны быть закрыты диском Солнца, вследствие изгибания (благодаря неевклидовости пространства-времени) при прохождении вблизи Солнца доходят до нас, и эти звезды делаются видимыми. Угловая величина отклонения согласно, теории Эйнштейна, составляет 1,75".¹

Наконец, подтверждение теории дает факт красного смещения спектральных линий, испускаемых атомами, находящимися в сильном поле тяготения, например в поле звезд с большой массой. Объяснение красного смещения аналогично объяснению запаздывания часов.

Частота света, испускаемого возбужденным атомом в более сильном поле, будет восприниматься в местах, где поле более слабо, как меньшая частота. Соответственно длина световой волны будет воспринята как увеличенная. Поэтому все линии спектра, испускаемого атомами, расположенными вблизи плотных звезд, должны сместиться к красному концу. Для Солнца это смещение крайне мало ($\sim 10^{-6}$), однако для спутника Сириуса (белого карлика, плотность которого велика) красное смещение в 30 раз больше, нежели для Солнца. Таково третье экспериментальное подтверждение теории тяготения.

В 1960 г. красное смещение в поле тяготения было экспериментально обнаружено в земных условиях американскими физиками Р. Паундом и Г. Ребкой. Они использовали для этой цели эффект Мёссбауэра (см. стр. 97). Им удалось установить, что при поднятии источника излучения в поле тяжести на расстояние ~ 20 метров происходит уменьшение энергии γ -квантов примерно на 10^{-15} .

5. Поле тяготения, создаваемое распределением и движением масс, характеризуется теми движениями, которые совершают в этом поле материальные точки, свободные от других внешних воздействий, и световые лучи. Этот способ характеристики поля по существу тот же, что и способ, применяемый для электромагнитного поля, в котором напряженности определяются по движению «пробного» заряда или магнитного полюса. При этом важно, чтобы материальная точка или пробный заряд существенно не влияли на поле; для этого необходимо, чтобы они были достаточно малы.

Однако между полем тяготения и электромагнитным полем имеется существенное различие. Уравнения Максвелла—Лоренца характеризуют зависимости между изменениями напряженностей, они определяют само поле, а также связь между полем и его источниками. Но они ничего не говорят о том, как действует поле на «приемник» — на заряд или на «магнитный полюс».

Иначе обстоит дело в теории тяготения. Здесь связь поля и движения гораздо сильнее. Математически это выражается в том, что уравнения для потенциалов поля вблизи масс имеют решения лишь в том случае, если последние движутся по геодезическим кривым. В свою очередь движение масс под действием поля вносит соответствующие изменения в характер поля, в выражения потенциалов поля, что опять-таки не может не сказаться на движениях масс. Образно можно сказать, что гравитирующие системы, т. е. совокупность масс и связанного с этими массами поля тяготения, образуют как бы «саморегулирующиеся» системы, в которых — при данных внешних условиях — должен установиться определенный стационарный режим движения¹⁾. Математически это обстоятельство обусловлено нелинейностью уравнений поля тяготения: последнее невозможно разложить на простую сумму полей, созданных разными источниками и наложенных друг на друга. Поле тяготения не подчиняется принципу суперпозиции, оно не представляет собой простой суммы полей, создаваемых отдельными массами.

6. Искключительная особенность поля тяготения, не свойственная никаким другим физическим полям, заключается, по Эйнштейну, в том, что оно сводится к специфике геометрии мировых линий, действует одинаково на все тела. Любое же другое поле — электромагнитное, ядерное, электронно-позитронное — действует на различные объекты по-разному, в зависимости от их зарядов и масс, а на объекты, лишенные соответствующего заряда, вообще не действует. Эта особенность гравитационного поля объясняется тем, что оно универсально, поскольку его зарядом является масса (точнее, произведение массы на гравитационную постоянную); поэтому его можно «геометризировать». Можно, однако, говорить не о «геометризации» поля, а о «динамизации» пространства и времени. Пространство-время выступает как проявление «универсального» поля, структура (метрические отношения) которого соответствует определенному распределе-

¹⁾ Стационарность не будет абсолютной потому, что система теряет энергию на излучение гравитационных волн (см. ниже); однако величина теряемой энергии крайне мала,

нию масс. Поле тяготения можно рассматривать как некоторую составляющую, входящую в любое поле, независимо от его природы. В этом смысле оно несколько не менее материально, чем любое физическое поле.

Доказательством материальности поля тяготения может служить то, что оно обладает энергией и импульсом.

В связи с этим представляет большой интерес дискуссия между Шредингером (которого в дальнейшем поддерживал Эддингтон) и Эйнштейном, имевшая место в 1918 г., вскоре после обоснования Эйнштейном полевой теории тяготения¹⁾. Шредингер отметил, что энергия поля тяготения в любой точке может быть сделана равной нулю путем подбора соответствующей системы отсчета (простым примером может служить свободно падающий лифт, в котором поле тяготения исчезает); а так как энергия и другие составляющие тензора в некоторой системе координат могут быть приравнены нулю, то выходит, что они не образуют тензора (вернее, плотности тензора). На этом основании он утверждал, что энергия-импульс поля тяготения есть величина фиктивная. Против этой точки зрения выступил Эйнштейн, который показал, что в разных системах отсчета получается лишь различное распределение энергии-импульса; энергию и импульс поля тяготения в большом объеме пространства-времени невозможно «уничтожить» никаким подбором системы отсчета. Особенность поля тяготения состоит в том, что, в отличие от других полей, его невозможно экранировать, т. е. однозначно локализовать в пространстве и во времени.

Несмотря на безусловную убедительность этого доказательства Эйнштейна, Эддингтон продолжал отстаивать тезис о фиктивности тензора энергии-импульса поля тяготения. В своей монографии «Теория относительности»²⁾ он писал: «Потенциальная энергия и количество движения, которые нам нужны, если мы хотим удержать формальный вид закона сохранения, не образуют тензора;

¹⁾ См. В. Паули, Теория относительности, Гостехиздат, 1947.

²⁾ А. С. Эддингтон, Теория относительности, ГТТИ, 1934, стр. 279.

их нужно рассматривать как математическую фикцию, а не как представление каких-либо имеющих физический смысл мировых соотношений». Неубедительность этих рассуждений очевидна, поскольку энергия поля тяготения «с равным правом» входит в баланс совокупной энергии любой замкнутой материальной системы, которая без учета энергии поля тяготения не сохраняется.

Общность поля тяготения и других физических полей сказывается также в том, что при ускорении масс должны излучаться гравитационные волны, распространяющиеся со скоростью света, подобно тому как при ускоренном движении заряженных частиц испускаются электромагнитные волны. Гравитационные волны должны испускаться, например, двойными звездами, которые обращаются вокруг общего центра тяжести. Эйнштейн показал, что в некоторых случаях возможно излучение цилиндрических волн¹⁾. Подсчет показывает, что энергия гравитационных волн ничтожно мала (по сравнению с энергией других волновых полей), однако малость гравитационных волн не делает их нереальными.

Теория тяготения Эйнштейна представляет собой большой шаг вперед в познании сущности пространства и времени, их связи с гравитационным взаимодействием масс, но в ней имеются еще неясные, нерешенные вопросы. Основной вопрос — это проблема связи поля тяготения с другими полями. Естественно полагать, что поле тяготения не может быть изолировано от других полей. Однако все попытки создать единую теорию электромагнитного поля и поля тяготения пока ни к чему не привели. Остается неясным также вопрос о связи универсальной постоянной тяготения с другими мировыми постоянными. Привлекает внимание и проблема изменения постоянной тяготения со временем (Дирак).

Особенно большой интерес в последние десятилетия вызвала возможность более общих решений уравнений гравитационного поля, или проблема гравитационного «фона», которую мы рассмотрим в следующем параграфе.

¹⁾ См., например, П. Г. Б е р г м а н, Введение в теорию относительности, ИЛ, М., 1948, стр. 214.

§ 13. Пространственно-временной «фон» известной части мира

1. Воззрения на пространство и время, сложившиеся в физике после создания общей теории относительности, могут быть выражены следующими словами Эйнштейна: «Если бы исчезла материя, то исчезли бы и пространство и время». Это и есть концепция пространства и времени как форм бытия движущейся материи.

Согласно теории тяготения Эйнштейна, массивные космические тела создают вблизи себя искривления пространства-времени; но кривизна характеризует структуру пространства-времени лишь в малой области. Естественно возникает вопрос: какова структура пространства-времени в целом, каков тот нулевой «фон», по отношению к которому берется кривизна?

Этот вопрос тесно связан с проблемой строения вселенной в целом, с распределением масс и характером движения материи, и привлекал внимание задолго до создания теории относительности. Эта проблема была поставлена еще в 19 веке, с одной стороны, в связи с так называемыми космологическими парадоксами, а с другой — в связи с проблемой инерции.

2. В 20-х годах 19 века Ольберс сформулировал так называемый фотометрический парадокс, получающийся в предположении о конечной плотности звезд в мире и бесконечности пространства. Поскольку освещенность любой площадки обратно пропорциональна квадрату расстояния от светящегося источника (звезды), а число источников (звезд) при возрастании объема пространства растет пропорционально кубу расстояния, то отсюда получается, что ночное небо должно было бы иметь бесконечную яркость. Такое заключение получается при любой плотности звезд, отличной от нуля, если только мировое пространство не поглощает света.

В 19 же веке Нейман и Зеелигер сформулировали другой парадокс — гравитационный, сущность которого заключается в следующем: если масса всех тел в мире бесконечна и средняя плотность отлична от нуля, то сила тяготения, исходящая от всех тел вселенной, в каждой точке пространства имеет неопределенное значение. Такой результат

получается потому, что масса звезд — источников поля тяготения — растет пропорционально объему, т. е. кубу расстояния от любой данной точки, а сила тяготения, исходящая от каждой звезды, убывает пропорционально квадрату расстояния. В действительности сила тяготения всегда определена и конечна. Для устранения парадокса предлагались различные гипотезы: 1) масса всех тел в мире конечна; 2) средняя плотность в мировом пространстве даже при бесконечной массе должна стремиться к нулю; 3) закон тяготения Ньютона неточен и должен быть изменен. Таким образом, оба парадокса приводят к вопросу о соотношении между «объемом» мирового пространства и количеством материи, его «наполняющим».

Первое допущение — конечность массы (соответственно числа всех атомов в мире) — было отвергнуто на том основании, что в этом случае под действием тяготения все тела должны были бы образовать одну-единственную систему. Хотя это заключение верно лишь при статическом рассмотрении (при достаточно большой энергии тел они, наоборот, рассеялись бы в бесконечном пустом пространстве), но мысль о конечности числа тел в мире не находила сторонников вплоть до 20-го века.

Второй возможный способ разрешения гравитационного парадокса — стремление средней плотности к нулю при переходе ко все большим космическим объемам — был подробно разработан Шарлье в первой четверти 20 века в «островной» модели вселенной. В основу островной модели положено представление о том, что мир образует иерархическую лестницу материальных систем, размеры которых последовательно возрастают быстрее, чем их массы, так что при постепенном переходе от систем меньшего порядка (N) к системам большего порядка плотность материи непрерывно уменьшается, стремясь к нулю при стремлении $N \rightarrow \infty$. В соответствии со схемой Шарлье, средняя плотность материи в солнечной системе должна быть больше, чем в Галактике, а в Галактике — больше, чем в Метагалактике. Это не противоречит данным наблюдения.

Однако и схема Шарлье, так же как и допущение о конечном числе материальных частиц, находящихся в бесконечном пустом пространстве, по существу покоится

на ньютоновых представлениях о пространстве и времени как вместилищах вещей и событий, безразличных к своему «наполнению». А это противоречит современной концепции пространства и времени. Мысль о стремлении средней плотности материи к нулю не созвучна фактам, свидетельствующим о значительной роли межзвездной рассеянной материи в эволюции космических систем.

Третье предположение сводится к необходимости ввести поправку к закону тяготения Ньютона. Такая поправка была предложена Зеелигером, который вместо ньютоновой силы, спадающей пропорционально обратному квадрату расстояния от источника тяготения, дал выражение для силы тяготения вида $\frac{e^{-ar}}{r^2}$; такая сила на больших расстояниях быстро убывает до нуля. Однако наблюдения не подтверждают правильности поправки Зеелигера.

Гравитационный парадокс не возникает в эйнштейновской теории гравитационного поля¹⁾. Во-первых, потенциалы тяготения являются запаздывающими, так как действие тяготения передается с конечной скоростью. Это означает, что поле тяготения от бесконечно удаленных тел достигает данной точки пространства лишь через бесконечно большое время. Во-вторых, поле тяготения не аддитивно: гравитационное действие системы тел не равно сумме соответствующих действий отдельных тел, образующих систему. Поэтому в теории поля тяготения гравитационный парадокс исчезает — поле тяготения остается определенным.

Этот результат весьма поучителен и в более общем смысле. Он показывает, в чем несостоятельность самой идеи, которая привела к изложенному парадоксу. Нельзя сводить действия материальных систем любого порядка к сумме действий образующих их подсистем. Принцип аддитивности применим лишь в ограниченной области явлений или величин. Однако это общее соображение не устраняет необходимости поисков конкретных способов

¹⁾ См. А. Л. Зельманов, Научные доклады Высшей школы. Физ.-мат. науки, № 2, 1958.

преодоления каждого парадокса в отдельности. И если гравитационный парадокс устраняется в современной теории, рассматривающей тяготение как поле, то с фотометрическим парадоксом дело обстоит хуже.

Космологические парадоксы представляют интерес в том отношении, что они приводят к проблеме распределения масс в целом, во всей известной нам части мира. Важной частью этой проблемы является вопрос о структуре мирового пространства-времени, т. е. о том, какова геометрия мира «в целом».

Этот вопрос был поставлен также в связи с проблемой сил инерции. Еще Мах высказал предположение, что инерция тел обусловлена их ускорением по отношению ко всем удаленным массам вселенной. В связи с этим Мах утверждал, что если бы можно было привести в ускоренное движение все удаленные массы по отношению к данному телу, то должны были бы появиться такие же силы инерции, как и при ускорении тела. Если бы это утверждение Маха можно было бы доказать на опыте, то это означало бы, что ускорение так же относительно, как скорость. Такие опыты были действительно поставлены. В 80-х годах прошлого века братья Фридлиндеры пытались обнаружить силы инерции у тела, окруженного массивным вращающимся колесом. Результат опыта оказался отрицательным. Впоследствии было показано, что в опыте Фридлиндеров величина эффекта вообще лежит за пределами наблюдения. Принцип Маха, как выяснилось в дальнейшем, не соответствует действительности. В сущности, он противоречит тому факту, что тяготение является полем. Оказался также несостоятельным вывод об относительности ускорения.

Эйнштейн также придерживался взглядов об относительности ускорения (принципа Маха). Он пришел к заключению, что правильное всего предположить конечность масс в мире. Таким образом, проблема инерции привела Эйнштейна к вопросу о структуре мира в целом.

3. При решении этой проблемы Эйнштейн избрал путь, намеченный еще Нейманом, а именно обобщил свое уравнение гравитационного поля, включив в это уравнение так называемую космологическую (космическую)

константу Λ . В этом случае уравнение тяготения принимает вид

$$R_{ik} + \Lambda g_{ik} = -\kappa \left(T_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} T \right).$$

Космологический член Λg_{ik} не зависит от распределения масс, а определяется только суммарной массой M всех тел вселенной. Наличие Λ в уравнении тяготения приводит к предположению о дополнительном, *негравитационном* воздействии на любое тело; в случае положительного Λ возникают силы отталкивания, возрастающие с расстоянием; при отрицательном Λ — силы притяжения, также не зависящие от распределения масс. Эти силы, например в пределах солнечной системы, ничтожно малы по сравнению с обычными силами тяготения, но в космических масштабах могут играть значительную роль. Мировое пространство вселенной имеет положительную кривизну даже вдали от отдельных масс, в среднем везде одинаковую; мировое пространство представляет собой трехмерный шар конечного и неизменного радиуса. Радиус кривизны мира связан с Λ соотношением $R^2 = 1/\Lambda$. В свою очередь Λ пропорционально постоянной средней плотности материи в мире: $\Lambda = \kappa \rho_0$. Следовательно, радиус мира (и кривизна пространства) однозначно определяется массой всех тел M : $R = \frac{\kappa M}{4\pi^2}$, где κ — постоянная тяготения. Разумеется, конечный трехмерный мир Эйнштейна является безграничным (подобно тому, как безгранична двухмерная сфера, если оставаться на ней самой, не выходя за ее пределы). Четырехмерный мир Эйнштейна представляет собой бесконечный цилиндр — он конечен пространственно и бесконечен во времени.

В эйнштейновском мире могут быть локальные неоднородности, но они также должны быть статическими. Таким образом, отказавшись от представления о пустом мировом фоне, не связанном с материей, Эйнштейн пришел к представлению о конечности мира. Конечный мир Эйнштейна оказался неудовлетворительной моделью реального мира, ибо эта модель неустойчива.

В самом деле, радиус мира в модели Эйнштейна определяется суммарной массой тел. Существенное значение

имеет также давление, обусловленное как движением частиц вещества, так и излучением. Предположим, что под действием возмущения мир испытал расширение объема. Возникшее при этом нарушение равновесия в модели Эйнштейна должно непрерывно нарастать, так как силы тяготения между телами ослабевают, а роль сил отталкивания по мере разлета тел возрастает. Если же возмущение вызвало уменьшение объема, то мир Эйнштейна должен сжаться «в точку». Такой мир не мог бы устойчиво существовать.

Мы не будем рассматривать другую статическую модель, предложенную де Ситтером, основанную на предположении, что средняя плотность материи во вселенной равна нулю. В современной космологии обе модели — Эйнштейна и де Ситтера — считаются лишь предельными случаями динамических моделей мира.

4. Глубокий сдвиг в космологии произошел после опубликования работ А. А. Фридмана. Фридман показал, что уравнение тяготения Эйнштейна имеет нестационарные решения, т. е. что оно вообще отображает мир с *изменяющейся* кривизной пространства-времени и соответственно с изменяющимся объемом пространства и с конечным значением истекшего времени. При этом наличие в уравнении тяготения космологического члена вовсе не необходимо, как это полагал Эйнштейн. Это означает, что возможны нестационарные модели мира и при отсутствии интегрального взаимодействия, не связанного с массами.

В теории Фридмана предполагается, что плотность материи в мире одинакова в любой точке (однородность) и что мир изотропен. Пространственно-временные свойства мира определяются значениями средней плотности и давления; последнее зависит от скоростей частиц и от плотности излучения.

Выяснилось, что при отсутствии космологической константы возможны два типа моделей: «закрытая», представляющая мир положительной кривизны (геометрия Римана), и «открытая», представляющая мир с отрицательной кривизной (геометрия Лобачевского).

Мир положительной кривизны может расширяться во времени от некоторого нулевого объема («особой точки») до максимального, а затем сжиматься снова до

минимума (об особенностях минимума см. ниже). Мир отрицательной кривизны может расширяться от минимального объема до бесконечности. Если же сохранить космологический член, то число возможных моделей оказывается значительно больше.

Особенно важно следующее обстоятельство. Каждая из нестационарных моделей мира соответствует определенной области значений средней плотности и давления. При значении средней плотности, равной 10^{-29} г/см³, мировое пространство было бы евклидовым; если средняя плотность больше этого значения, то реализуется закрытая модель, если меньше — открытая. Имеющиеся наблюдательные данные не дают возможности однозначно решить вопрос о значении средней плотности в наблюдаемой части Метагалактики.

5. Важнейшую роль в развитии представлений о мировом пространстве-времени сыграло открытие Хабблом галактического красного смещения: спектры излучения далеких галактик смещаются к красному концу приблизительно пропорционально расстоянию галактик от точки наблюдения.

Попытки истолковать красное смещение как следствие «старения фотонов» на пути распространения света не могут считаться удовлетворительными. Главный довод против такого истолкования заключается в том, что красное смещение одинаково для всех диапазонов электромагнитных волн; кажется весьма сомнительным существование единого механизма потерь энергии для фотонов любой частоты. Поэтому красное смещение истолковывается как доплеровский эффект, обусловленный разбеганием галактик (сами галактики не расширяются). Это означает, что наблюдаемая часть мирового пространства реально деформируется.

Этот факт имеет фундаментальное значение. Он доказывает динамичность вселенной. Вместе с тем обобщается понятие пространства и времени. Старая проблема — что произойдет, если размеры всех тел в мире изменятся, — приобретает новый смысл. Ответ, который давали на этот вопрос последователи Лейбница: «в природе ничего не изменится, если размеры всех тел увеличатся или уменьшатся в одинаковое число раз, поскольку

размер есть относительное понятие», неверен. Он справедлив лишь в том случае, если речь идет о статике, о сопоставлении явлений в различных состояниях равновесия. Ибо при деформации пространства появляются эффекты, обусловленные изменением его кривизны; спектр света, испускаемого телами, будет испытывать красное смещение, если мировое пространство расширяется, и фиолетовое, если оно сжимается.

Мировое пространство удобно отображать в так называемых сопутствующих системах координат, в которых каждая «частица» материи (галактика или даже скопление галактик) в среднем покоится. Расширение мира сказывается в том, что кривизна пространства меняется со временем, а «частицы» материи разбегаются, поскольку расстояние между ними при уменьшении кривизны увеличивается. В сопутствующей системе отсчета в однородном деформирующемся мире время везде может быть отделено от пространства.

Мировая система отсчета, разумеется, применима лишь при условии, если расширение или сжатие «мира» везде изотропно и однородно.

Мы неоднократно оговаривали, что речь идет о мире в кавычках, а именно об известной нам части мира. Относить космологические модели к миру в целом не имеет смысла хотя бы по той причине, что все известные наблюдательные данные (в том числе и красное смещение) относятся только к Метагалактике, вернее, к ее части. Поспешные попытки экстраполяции сделанных выводов на весь мир представляются необоснованными.

Наблюдения последних лет полностью подтверждают такое понимание «мира». В частности, доказано, что разбегание галактик постепенно замедляется.

Как показывает теория, изменения «мирового пространства» обусловлены процессами, связанными с изменением средней плотности и давления. О сущности этих процессов можно пока строить только догадки. В частности, это может быть аннигиляция частиц вещества в нашей части космоса. Мы не располагаем также никакими данными, чтобы утверждать что-либо о тех факторах, которые определяют средние значения плотности и давления.

6. Таким образом, основной наблюдательный факт, на котором базируется современная концепция мирового пространства — замедленное разбегание галактик, — естественно истолковать в пользу его неевклидовости (евклидовость возможна только при одном-единственном значении плотности).

Другими словами, даже вдали от больших скоплений вещества нельзя приписывать пространству евклидову метрику. Неевклидовость пространственного фона, наличие у пространства кривизны, отличной от нуля, определяет относительные размеры частей пространства в каждый момент «мирового» времени, поскольку эти размеры связаны с кривизной. Однако сама кривизна «мира» зависит от средних значений плотности и давления, которые, в свою очередь, должны зависеть от взаимодействия нашей мировой системы с другими «вселенными». Оставаясь в рамках нашей части мира, мы вынуждены рассматривать значения средней плотности и давления в какой-либо момент времени как начальные данные, которые должны быть найдены из наблюдений.

Рассмотренные выше однородные и изотропные модели известной части мира вряд ли можно признать удовлетворительными. Имеются значительные расхождения между возрастом нашей мировой системы, вычисленным из этих космологических моделей (10—15 миллиардов лет), и теми значениями возраста, которые получаются на основании астрофизических данных (25—30 миллиардов лет); последние превосходят по величине космологические данные. Эти расхождения оказываются еще более существенными в свете результатов звездной космогонии, из которых следует вывод о продолжающемся образовании звезд и звездных систем.

В последние годы ряд исследователей приходит к заключению, что расширение известной части мира на самом деле неоднородно и анизотропно; мировое пространство-время в действительности неоднородно и «в большом». Данные наблюдений свидетельствуют и об анизотропности «мирового» пространства-времени. Теория неоднородного и анизотропного «мира» дает иную картину развития нашей мировой системы, нежели прежние

однородные и изотропные модели; согласно этой теории Метагалактика сперва испытала ускоренное расширение от регулярного минимума, которое сменилось затем замедленным. При таком допущении данные космологии о возрасте Метагалактики можно согласовать с данными астрофизики.

В этой теории исчезают особенности (особые точки) решений. Первоначально, когда «особые точки» осциллирующего «мира» рассматривались как состояния бесконечно большой плотности, а космология относилась ко вселенной в целом, начальную и конечную «особые» точки часто принимали соответственно за «начало» и «конец» мира. С этим связывались прямые фидеистические рассуждения о сотворении мира и его гибели. Такое истолкование космологии, конечно, не имеет ничего общего с научным мировоззрением. Рациональный смысл «особых точек» может заключаться только в том, что вблизи них имеет место переход материи в нашей части мира в такое состояние, для которого неприменимы уравнения Эйнштейна. В 1960 г. А. Л. Зельманов показал, что в неоднородном и анизотропном мире можно говорить только о регулярном минимуме, а не о точечных особенностях решений.

§ 14. Проблемы пространства и времени в общей теории относительности

1. Общая теория относительности представляет собой дальнейший этап в развитии современной теории пространства и времени по сравнению со специальной теорией относительности.

Важнейшие результаты, полученные Эйнштейном в общей теории относительности, можно сформулировать так:

4) Вблизи больших концентраций масс пространство-время уже не является галилеевым, или «плоским»; только в сравнительно малой области пространство-время можно считать приближенно плоским. Это значит, что *внутри* сравнительно небольшого тела (например, в космическом корабле), свободно движущегося вблизи больших масс, изменения свойств пространства и времени не обнаруживаются; квазитвердое тело в достаточно малый про-

межуток времени и в достаточно малой области пространства есть базис инерциальной системы отсчета. Но двигаясь в поле тяготения большой массы, тело последовательно оказывается базисом множества различных инерциальных систем отсчета; пространственно-временные отношения в теле являются «физически подобными». В целом же для большой области пространственно-временные отношения вблизи больших масс не остаются галилеевыми; четырехмерная геометрия такой области является неевклидовой, «искривленной». Это проявляется в том, что представление о «твердом каркасе» (наборе твердых тел) уже не имеет смысла, частота любого периодического процесса в теле при переходе из одних мест в другие (с разными значениями потенциалов тяготения) изменяется, само движение тела (материальной точки) происходит не по прямой, а по геодезической кривой, распространение светового луча также не прямолинейно. В общем случае невозможно сохранить представление о пространстве-времени как совокупности рядом расположенных «твердых» тел и синхронизированных часов. Пространство и время вблизи масс деформированы, «моллюскообразны». В частности, вследствие «деформации» пространства-времени при ускорении базиса системы отсчета открывается принципиальная возможность влиять на ход времени.

2) В структуре пространства-времени вблизи масс проявляется поле тяготения, создаваемое массами, которые выступают как источники (заряды) поля тяготения. Полевой характер тяготения в особенности проявляется в том, что изменения метрики пространства-времени распространяются с конечной скоростью, равной скорости света (гравитационные волны).

3) Пространство-время в космических областях, вдали от больших концентраций масс, в общем случае также не является галилеевым (плоским). Пространственно-временной фон той или иной части мира определяется средними значениями плотности и давления. Поскольку эти значения изменяются, геометрия «мирового» фона является динамической, а не статической. Наблюдения показывают, что известная нам часть Метагалактики расширяется, и притом замедленно. Можно предполагать, что

части «мирового» пространства «пульсируют». Оставаясь в ограниченной части мира и не зная ничего о ее связях с другими частями, мы вынуждены принять среднюю плотность в этой части мира как величину заданную, ничем не обусловленную.

Установление неевклидовости «мирового» фона, зависимости средней кривизны «мирового» пространства-времени от средней плотности означает, что из физики окончательно исключаются последние остатки ньютоновых воззрений на пространство и время, сохранявшиеся еще на предшествующих этапах. Из общей теории относительности сначала было сделано заключение, что вдали от масс пространство и в больших масштабах является плоским. Время жизни мировых систем — типа Метагалактики — также считалось неопределенным. Другими словами, получалось, что пространственно-временные свойства «большого мира» независимы от его структуры. Отказ от плоского фона приводит к определенным значениям «радиуса» исследуемой части мира и ее времени жизни, начиная от «особой точки» — начала расширения; обе эти величины оказываются функциями от материальных параметров — плотности и давления. Таковы важнейшие выводы из современной космологии, основанной на общей теории относительности, и в них еще глубже вскрывается связь между свойствами пространства и времени как общих форм сосуществования и последовательности явлений и свойствами поля как формы материи, осуществляющей связь между материальными системами.

2. Однако единого понимания основных положений общей теории относительности не существует. Различные трактовки общих положений теории, даваемые разными авторами, подчас связаны с различным миропониманием, философскими взглядами.

Основная идея Эйнштейна, которой он руководствовался при создании общей теории относительности, заключалась в дальнейшем обобщении принципа относительности: законы физики должны быть одинаковы в *любой* системе отсчета, а не только в инерциальных системах. Как писал Паули, «произвольно движущиеся системы отсчета *кинематически* совершенно равноправны, и это подсказывает предположение об их равноправности

и в динамическом и вообще физическом отношении... Поэтому не остается ничего другого, как допустить рассмотрение всех мыслимых систем координат. Координаты рассматриваются как вполне произвольные параметры, произвольным однозначным и непрерывным образом поставленные в соответствие с мировыми точками (гауссовы координаты)»¹⁾.

Из сказанного следует, например, что можно измерять время в разных точках часами с произвольным ходом; важно лишь, чтобы ход часов от точки к точке изменялся непрерывно.

Откуда же следует равноправность любых систем отсчета? Первоначальная аргументация Эйнштейна такова. Все физические измерения, указывает Эйнштейн, сводятся к констатации совпадений различных рядов событий; ничто, кроме этих совпадений, не наблюдается. В качестве системы отсчета можно произвольно выбирать ту или иную совокупность событий. Можно относить все события в мире, например, к Земле. С этой точки зрения система Птолемея несколько не хуже системы Коперника — они вполне равноправны. Преимущественных систем отсчета не существует.

Но не внесет ли выбор некоторой произвольной системы отсчета искажений в наблюдаемые закономерности, обусловленные движением самой системы? Ведь могут появиться, например, центробежные силы и силы Кориолиса, «действующие» на вполне свободную материальную точку; другими словами, появятся силы инерции, обусловленные ускоренным движением системы отсчета, которые исчезнут при переходе к инерциальной системе. Это возражение, по мнению Эйнштейна, устраняется принципом эквивалентности. Принципиально невозможно, указывает он, различать поле сил инерции и поле тяготения. Мы не можем сказать, отчего тело свободно падает: потому ли, что на него действует поле тяготения, или же потому, что его движение отнесено к ускоренной системе отсчета.

Принцип эквивалентности рассматривался Эйнштейном как физическое обоснование общей относитель-

¹⁾ В. Паули, Теория относительности, Гостехиздат, 1947, стр. 217.

ности — равноправности произвольных систем отсчета. Таким образом, пространство и время выступают как способы произвольной координации событий.

3. Изложенная здесь трактовка исходных положений общей теории относительности подверглась критике в ряде работ. Наиболее обстоятельная критика этих воззрений была дана В. А. Фоком в его монографии «Теория пространства, времени и тяготения» и в ряде предшествующих работ.

Впервые критика общей относительности как принципа ковариантности уравнений физики была дана Кречманом еще в 1917 г. Он показал, что утверждение о возможности придать физическим законам ковариантную форму, одинаковую в любых системах отсчета, не есть новый физический принцип. Ковариантная запись уравнений осуществляется и в классической механике (обобщенные уравнения Лагранжа); это не исключает справедливости законов Ньютона только в инерциальных системах отсчета. Более того, в классической механике можно применять действительно произвольно движущиеся системы отсчета, чего нельзя делать, как мы сейчас убедимся, в теории относительности. Следовательно, ковариантность вовсе не означает общей относительности. Эйнштейн тогда же согласился с критикой Кречмана и подчеркнул, что физической основой общей относительности является принцип эквивалентности.

Однако, как уже было отмечено в § 12, принцип эквивалентности отнюдь не означает невозможность различать поле сил инерции и поле тяготения в произвольно большой области. На самом деле эквивалентность этих полей имеет место только в очень малых областях, и притом в первом приближении. Следовательно, есть реальная возможность в целом отличить поле тяготения, создаваемое массой, от поля сил инерции, обусловленной ускоренным движением системы отсчета, а вместе с тем отпадает и общая относительность. Релятивизировать ускорение не удалось.

Действительный смысл общей теории относительности, как было отмечено, заключается не в том, что физические явления можно относить к произвольной системе отсчета, а в том, что метрика пространства-вре-

мени в общем случае является неевклидовой и определяется распределением и движением масс.

4. Можно ли вообще выбирать *произвольные* системы отсчета, т. е. отнести все процессы в мире к произвольно движущемуся телу?

Формально это возможно. Но если мы стремимся разделить реальные пространственно-временные отношения, осуществляющиеся в природе, и в соответствии с этими отношениями выявить объективные физические закономерности, то, как уже было показано выше, произвольный выбор системы отсчета невозможен.

Прежде всего, система отсчета должна быть такой, чтобы: 1) местная скорость света была равна c , 2) два близких события, не могущие находиться в причинно-следственной связи, были разделены пространственно-подобным интервалом. Эти требования налагают определенные условия на коэффициенты g_{ik} , связывающие дифференциалы координат пространства и времени с интервалом ds ; в частности, коэффициент g_{44} , стоящий при временной координате, должен быть отрицательным.

Во-вторых, любая система отсчета, удовлетворяющая этим условиям, но движущаяся ускоренно, может быть только *локальной*. Если ускоренная система отсчета движется поступательно, то она применима только для описания событий, координаты которых меньше $\frac{c^2}{a}$ (a — ускорение системы); если система отсчета вращается, то она пригодна только для расстояний, меньших $r = \frac{c}{\omega}$. В противном случае местная скорость материальных точек станет равной или большей c .

В-третьих, в физически реализуемой системе отсчета должна быть возможна синхронизация часов; если вращение системы не мало, то в ней синхронизация часов в конечной области неоднозначна — она зависит от кривой, вдоль которой производится синхронизация.

Наконец, ускорение системы отсчета должно быть таким, чтобы ее базис можно было считать квазитвердым.

Все эти требования настолько ограничивают выбор *физически реализуемой* системы отсчета, что ни о какой «произвольности» не может быть речи.

Из сказанного ясно, что неправильно ставить вопрос о равноправии систем Птолемея и Коперника. С Землей можно связать систему отсчета, пригодную для пространственно-временной координации сравнительно узкого круга явлений по сравнению с системой отсчета, связанной с Солнцем. При этом важно подчеркнуть, что эти системы отсчета физически неравноценны не только динамически, но и кинематически. Открыть законы Кеплера можно было, только перейдя от геоцентрической системы к гелиоцентрической, хотя законы Кеплера являются чисто кинематическими. Различие между разными системами отсчета здесь в некоторой степени аналогично различию между лабораторной и собственной (ц - системой) системами отсчета; чтобы сразу же отделить внутренние взаимодействия в материальной системе от внешних, надо перейти к ц-системе. Однако это только аналогия, ибо законы физики выражаются одинаково и в лабораторной, и в ц-системе. Собственное же ускорение системы отсчета настолько затемняет ход физических процессов, что для открытия закономерностей необходимо перейти к системе отсчета, естественно связанной с телами, в которых сконцентрирована большая часть масс материальной системы. Когда же закон познан, тогда легко сформулировать его и в более общей форме.

Таким образом, действительный смысл общей теории относительности состоит не в установлении общей относительности, а в раскрытии более общих закономерностей пространства и времени и выяснении связи метрики пространства-времени с реальным распределением и движением масс.

5. Еще более трудные вопросы связаны с трактовкой поля тяготения. Обычно поле тяготения сводится к метрике пространства-времени. Тем самым оно резко противопоставляется другим полям — электромагнитному и ядерному.

Электромагнитное поле принято рассматривать как особую форму материи, осуществляющую взаимодействие между заряженными частицами вещества. Но оно не противопоставляется абсолютно веществу: при известных условиях фотоны порождают заряженные частицы, и, наоборот, при аннигиляции заряженных час-

тиц и античастиц рождаются фотоны. Сказанное справедливо и для ядерного поля.

Иначе обстоит дело с полем тяготения. В общей теории относительности оно геометризовано и поэтому абсолютно противостоит источникам поля тяготения. Поле тяготения сводят к метрике пространства-времени потому, что оно рассматривается как универсальное поле, присущее *всем* без исключения материальным объектам, обладающим массой. Отсюда обычно делается вывод, что других форм полевой связи между космическими материальными телами вообще не существует. В этом отношении поле тяготения считается предельным, абсолютным.

Такова одна трактовка поля тяготения. Однако можно понимать поле тяготения и как форму материи, а метрику пространства-времени рассматривать как ее проявление!

В пользу этой трактовки поля тяготения говорит существование гравитационных волн. Если предположить, что слабое переменное поле тяготения квантовано и в связи с этим представить себе порождение частиц вещества за счет гравитонов, то мы тем самым отказываемся от геометризации поля тяготения; в этом случае оказывается невозможным сводить поле тяготения к чистой метрике — к особенностям движения материальных частиц и световых лучей в пустом пространстве-времени, так как нелогично представлять себе возникновение частиц вещества за счет метрики пространства-времени, т. е. за счет общих свойств координации имеющихся частиц.

В математическом аспекте противоречие проявляется в тензорном характере энергии-импульса материи и псевдотензорном характере энергии-импульса поля тяготения (о котором говорилось в § 12). Псевдотензорность энергии-импульса поля тяготения, естественно, связана с принципом эквивалентности. Но вместе с тем интеграл от суммы тензора энергии вещества и псевдотензора энергии поля тяготения *сохраняется*. Выход из этого противоречия пока найти не удалось. Это заставляет думать, что современная теория поля тяготения существенно неполна.

Если же гравитационное поле не сводится к метрике пространства-времени, то, следовательно, оно обладает и другими характеристиками (кроме метрических),

которых мы пока не знаем. Возможно также, что и константа связи поля тяготения и вещества (гравитационная постоянная) на самом деле либо не постоянна (Дирак), либо даже не универсальна. Наконец, высказывается предположение, что связь больших космических систем (скоплений галактик) осуществляется не тяготением, а полем неизвестной нам природы.

По этим соображениям нам представляется более правильным говорить о метрике пространства-времени как проявлении гравитационного поля.

6. Большую дискуссию вызвал вопрос о бесконечности вселенной во времени и в пространстве, который стал особенно актуальным в связи с космологическими моделями. По сути дела, спор идет о том, можно ли эти модели относить к миру в целом или же к известной части Метагалактики. Доводами в пользу того, что предложенные модели относятся к миру в целом, являются: 1) однородность распределения галактик в наблюдаемой области мира (так называемый космологический принцип) и 2) линейное возрастание красного смещения вследствие «разбегания» галактик. Эти особенности экстраполируются на мир в целом.

Неубедительность этих доводов выявляется все в большей степени по мере накопления фактов, свидетельствующих о структурности, неоднородности и анизотропности наблюдаемой части мира. Об этом говорит, в частности, замедление разбегания галактик. Следует согласиться с соображениями о недопустимости распространения обоих предположений на космические системы любых порядков, а тем более на вселенную в целом.

Утверждение о конечности мира во времени вообще несовместимо с сохранением материи; принятие этого утверждения предполагает акт творения. Следовательно, оно не имеет ничего общего с наукой. Что же касается утверждения о конечности мира в пространстве, то по существу оно сводится к проблеме существования предельной системы, не являющейся, в свою очередь, частью другой, более общей системы. Такая замкнутая система должна была бы иметь постоянную (сохраняющуюся) энергию и, возможно, момент количества движения. Такой объект по сути дела был бы квазистатическим.

Допущение, что существует конечная система, в которой нет развития, естественно приводит к мысли об отсутствии развития в частях этой системы. Однако на самом деле мы наблюдаем индивидуальное развитие любой известной нам части мира.

Таким образом, допущение, что существует такая конечная материальная система, которую можно считать предельной, не представляющая, в свою очередь, часть более общей системы, — представляется неосновательным. Экстраполяция свойств ограниченной системы на весь мир недопустима.

Можно предполагать, что при переходе к космическим системам еще более высоких порядков может измениться характер связи между этими системами и осуществиться качественный скачок в свойствах пространства и времени.

В связи с проблемой бесконечности вселенной представляют интерес исследования А. Л. Зельманова¹⁾ по этому вопросу. Зельманов показал, что решения вопроса о пространственной бесконечности или конечности мира, полученные в той или иной системе отсчета, вообще не являются однозначными: трехмерный «объем» мира, который получается бесконечным в одной системе отсчета, может оказаться частью пространственноконечного мира в другой системе отсчета. Кривизна пространства оказывается различной в разных четырехмерных системах отсчета. Нам представляется, что этот результат согласуется с высказанным здесь мнением о невозможности существования мировой системы отсчета для неоднородной и анизотропной вселенной.

¹⁾ ДАН 124, № 5, 1959.

ГЛАВА IV

ПРОБЛЕМА ДЕЛИМОСТИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

§ 15. Точечное событие в доквантовой физике

1. Вопрос о том, какой смысл имеют слова: «точка в пространстве» и «момент времени» — был поставлен в философии еще в древности. По существу он сводится к вопросу о пределах реальной делимости пространства и времени.

Некоторые сторонники атомистического направления, жившие до Ньютона (например, Эпикур), полагали, что пространство и время можно мыслить состоящими из «атомарных» неделимых элементов. Эпикур усматривал в идее атомарности пространства и времени разрешение известных апорий Зенона. К этой точке зрения примыкали и некоторые арабские философы. Но эти представления были чисто умозрительными и не опирались на какие-либо факты; в науке нового времени (17—19 века) они не играли никакой роли.

В ньютоновой концепции решение этой проблемы не вызывало сомнений. Пространство и время считались абсолютно непрерывными и не только потенциально делимыми до бесконечности, но и в действительности (актуально) разделенными соответственно на бесконечные множества точек и мгновений, лишенных размера.

В соответствии с этим представлением и границы тел и явлений считались абсолютно резкими. Пространственная граница тела — это геометрическая поверхность, проходящая через внешние точки тела. Временные границы явления — это мгновения, когда данное явление

начинается и завершается; поскольку всякое явление связывается в конечном счете с механическими перемещениями, границы явления определяются начальным и конечным моментами перемещения.

Сложнее решался вопрос о пределах делимости пространства и времени в лейбницевой концепции. Поскольку пространство и время рассматриваются как порядок тел и событий, делимость пространства и времени сводится к делимости самих тел и явлений. Сам Лейбниц в своей «Монадологии» приписывал дискретность только идеальным сущностям вещей, но не их физико-механическим проявлениям; он полагал, что вещи и явления делимы до бесконечности. Следовательно, пространство и время также делимы до бесконечности. Однако, большинство философов-материалистов 18 века вслед за Аристотелем говорит о возможности бесконечного деления тел и явлений, но не об их реальной разделенности. Это означает, что пространство и время нельзя считать состоящими соответственно из бесконечного множества точек и мгновений.

Однако в то время не пытались выяснить, в какой мере силы могут реально вызывать бесконечное деление тел или явлений. Как уже было сказано, для постановки этого вопроса не было никаких реальных оснований. Все же важно подчеркнуть, что в концепции Лейбница принципиально возможна постановка такого вопроса; эта проблема была поставлена только в нашу эпоху.

В ньютоновой физике, для которой понятия абсолютного пространства и времени служили естественной основой теории, возможность установить на опыте бесконечную делимость пространства и времени также не вызвала сомнений. Вся классическая механика основана на идее чистой непрерывности пространства и времени; истинная скорость материальной точки (или истинное ускорение) относится к определенной точке пространства и определенному моменту времени. Таким образом, реальность точечных событий казалась очевидной. В ньютоновой физике прерывность приписывается не движению (и соответственно не пространству и времени), а частицам материи, имеющим определенные границы.

2. Классическая теория поля еще более укрепила идею чистой непрерывности всех физических процессов, а следовательно, и пространства и времени. Поле по самой природе считалось только непрерывным; его действие проявляется в каждой точке пространства в определенный момент времени. Однако, когда мы рассматриваем поле в связи с веществом, понятие чистой непрерывности оказывается противоречивым. Ибо точечность действий поля может быть установлена на опыте только при воздействии поля на дискретный *точечный* заряд. Но предположение о существовании точечных зарядов встречается с трудностями, поскольку энергия собственного поля такого заряда получается бесконечной, что обусловлено неограниченным возрастанием напряженности его собственного поля в непосредственной близости от заряда. Противоположное же допущение — о распределенном элементарном заряде — также противоречиво. Если приписывать электрону конечный размер, внутри которого распределен его заряд, то для объяснения сохранения электрона как целого приходится вводить «внутреннее» неэлектрическое поле, которое стягивает его части в одно целое. Это предположение не дает объяснения атомизма заряда: при сильном столкновении электрон мог бы разделиться на части, несущие дробный заряд, что противоречит опыту. Попытки устранить глубокие противоречия классической теории поля, связанные с проблемой точечности заряда, предпринимались еще в 30-х годах нашего века (М. Борн и Л. Инфельд). Они стремились найти разрешение указанного противоречия путем построения нелинейной теории электромагнитного поля. Мы коротко остановимся здесь на этой попытке.

Основная идея нелинейной классической теории поля заключается в том, что электрон должен рассматриваться как «особенная область» электромагнитного поля. Особенность выражается в том, что вблизи центра симметрии стационарного поля закон Кулона перестает быть верным. В самом деле, чтобы энергия поля не была бесконечной, нужно, чтобы в непосредственной близости от точечного заряда напряженность поля не возрастала до бесконечности, а стремилась к конечному максимальному значению E_0 , а это требует отказа от закона Кулона

вблизи центра симметрии электрона (вблизи $r=0$). Допущение о максимальной напряженности тем самым влечет за собой отказ от линейной теории электромагнитного поля, в которой нет предела для роста напряженности. Чтобы сохранить, по крайней мере формально, положение о точечности электрона, Борн и Инфельд предположили, что электромагнитное поле электрона характеризуется двумя парами величин напряженностей: \mathbf{E} и \mathbf{D} , \mathbf{H} и \mathbf{B} . \mathbf{D} и \mathbf{B} связаны с \mathbf{E} и \mathbf{H} определенными соотношениями и на значительных расстояниях от электрона переходят в них. Чтобы получить такой результат, Борн и Инфельд предложили определенное выражение для плотности энергии поля, такое, что вблизи центра симметрии электрона поле изменяется очень медленно, так, как если бы в этой области, характеризуемой некоторой величиной r_0 , существовал непрерывно распределенный заряд. В нелинейной теории величина r_0 («эффективный размер» свободного электрона) получается равной $\sim 10^{-13}$ см, а максимальная напряженность поля E_0 в «центре» электрона $\sim 10^{16}$ абсолютных электростатических единиц. Таким образом, в нелинейной электродинамике пространственно распределенный «квазизаряд» считается не первичным свойством, создающим поле, а следствием закономерностей поля. Но в теории Борна и Инфельда остается неясным, чем вызван специфичный закон изменения напряженности поля \mathbf{E} , положенный в основу рассматриваемой теории; выбор закона совершенно произволен и не опирается на какие-либо прямые физические эксперименты. Уже по этой причине теория не получила широкого признания и развития.

Однако более существенно то обстоятельство, что в нелинейной теории содержатся трудности. Само допущение об определенном ходе изменения напряженности поля вблизи центра симметрии электрона глубоко противоречиво. Согласно квантовой электродинамике (см. ниже), даже в области с линейными размерами 10^{-11} см, на два порядка больше r_0 , электрон не сохраняет свою индивидуальность; тем более это справедливо для взаимодействий в области размера r_0 (область ядерных взаимодействий), где он заведомо не может существовать. Следовательно, утверждение об определенном ходе напряженности поля вплоть до r_0 противоречит фактам. Таким

образом, предположение о существовании «чисто» электромагнитного поля с центрами симметрии, также существующими «от века», оказалось неудовлетворительным, не соответствующим действительности. Следовательно, идея о возможности физической реализации «точки в пространстве» в классической теории поля приводит к неразрешимым противоречиям: оказывается, протяженная заряженная элементарная частица не может существовать, а точечный заряд — тем более.

Теория относительности, отвергая ньютонову концепцию пространства и времени, в проблеме «точечности» не выходит за пределы дорелятивистской теории поля. Теория относительности также исходит из понятия «точечного события», т. е. основана на идее чистой непрерывности движений в природе и, следовательно, бесконечной делимости пространства и времени. Более того, она явно отвергает возможность существования абсолютно дискретных «твердых» и неделимых частиц вещества, так как по идеально твердой частице могут передаваться только бесконечно быстрые воздействия. Можно сказать, что представление о точечности объектов и явлений, их неограниченной делимости органически входит в теорию относительности и проведено в этой теории еще более последовательно, чем в старой атомистической физике и дорелятивистской теории поля. Поэтому все трудности, к которым приводит электронная теория при попытке построить образ точечной частицы, несущей конечный заряд, сохраняются и при релятивистском рассмотрении.

Вопрос о возможности измерения «точки» и «мгновения» встал по-новому в квантовой механике в связи с новыми представлениями о микрочастице и ее состоянии движения.

§ 16. Проблема локализации в квантовой механике

1. Чтобы уяснить специфический смысл понятия «локализация микрочастицы», необходимо сначала подробнее рассмотреть особенности движения микрочастиц, вскрытые квантовой механикой.

Эти особенности выявляются уже в исходных положениях квантовой механики — в соотношениях де Брой-

ля, устанавливающих своеобразную связь между импульсно-энергетическими характеристиками микрочастицы и пространственно-временным (кинематическим) аспектом ее движения, — связь, неизвестную в классической механике.

Основные факты, на которых основываются соотношения де Бройля, свидетельствуют о двойственной корпускулярно-волновой природе движения микрочастиц — фотонов, электронов, протонов и др.

Еще до открытия де Бройля была установлена двойственная природа света. С одной стороны, свет есть поток электромагнитных волн; это доказывается явлениями интерференции и дифракции. Корпускулярные же свойства выявляются в закономерностях испускания и поглощения света, в частности фотоэффекта.

Эти закономерности можно объяснить, если представлять себе свет как состоящий из особых частиц — фотонов, обладающих определенной энергией и импульсом и действующих как целое. Следовательно, свет имеет и волновую природу и корпускулярную; природа его двойственна. Вместе с тем эти две стороны света взаимосвязаны. С фотоном связана определенная частота, которая входит в выражение его энергии и импульса; тем самым мы рассматриваем дискретный фотон одновременно и как волновое образование.

Допущение де Бройля состояло в том, что *любые* микрообъекты обладают двойственной корпускулярно-волновой природой. Де Бройль предположил, что для любых микрочастиц имеет место определенное соотношение между энергией ϵ и частотой ν , а именно: $\epsilon = h\nu$. Энергия любой микрочастицы связана с частотой некоторого периодического процесса, соответствующего движению данной частицы. Для вектора импульса \mathbf{p} получается тогда соотношение $\mathbf{p} = h\mathbf{k}$, где \mathbf{k} — волновой вектор, абсолютное значение которого равно числу длин волн на одном сантиметре, h — так называемая постоянная Планка.

Это допущение получило блестящее экспериментальное подтверждение в явлении дифракции электронов. Дифракцию электронов можно получить, например, пропустив пучок электронов через подходящую «дифракционную решетку» — тонкую пленку из прессованного

кристаллического порошка. Пучок электронов после прохождения через дифракционную решетку дает на фотопластинке или на люминесцирующем экране дифракционные кольца.

Двойственная природа доказана на опыте не только для электронов, но для всех микрочастиц. С одной стороны, заряженные микрочастицы при движении в камере Вильсона оставляют след, т. е. движутся подобно частице; с другой стороны, они обнаруживают явление дифракции подобно волне.

2. Каков же физический смысл двойственности? Как можно себе представить возможность сочетания волновых и корпускулярных свойств в одном объекте? С точки зрения классической физики такое сочетание кажется непостижимым.

В самом деле, когда в классической физике говорят о частице (корпускуле), то представляют себе резко ограниченный в пространстве объект, который движется и действует как целое. Корпускула может быть и сколь угодно сложной системой, однако, поскольку у нее имеется резко ограниченный объем и определенное распределение масс внутри этого объема, она имеет центр инерции, который непрерывно движется по некоторой траектории. Когда в классической физике говорят о волне, то представляют себе распространение некоторого колебательного (периодического) процесса в непрерывной среде. Чисто монохроматическая волна должна простираться безгранично в пространстве и во времени. Поэтому понятие «центра инерции» волны не имеет смысла. Это резко отличает волну от частицы. Волна отличается от частицы также тем, что в каждой области пространства проявляется действие лишь «части» волнового образования.

Очевидно, двойственность микрочастиц не может означать, что микрочастица сочетает все свойства корпускулы и все свойства волны. Речь может идти о сочетании некоторых свойств корпускулы с некоторыми свойствами волн. Это означает, что микрочастицу нельзя представлять себе ни как обычную частицу, ни как обычную волну (или пакет волн).

Какими же корпускулярными свойствами обладает микрочастица? Корпускулярность микрочастицы состоит

в том, что она действует как целое — с определенными значениями энергии и импульса. Но микрочастице нельзя приписать движения по определенной траектории с определенными скоростями. След заряженной частицы в ионизационной камере отнюдь нельзя рассматривать как некую непрерывную траекторию. Если бы микрочастица обладала центром инерции и двигалась бы по траектории по определенному закону, то это исключало бы наличие у частицы волновых свойств — интерференции и дифракции — и соотношения де Бройля не имели бы места.

Вместе с тем и волновые особенности движения микрочастиц нельзя представлять себе чисто классически. Наиболее характерная волновая особенность движения микрочастицы — это свойство периодичности. Оно проявляется особенно наглядно при прохождении микрочастиц через периодическое поле дифракционной решетки. Для движения микрочастиц характерна также такая волновая особенность, как суперпозиция состояний.

Однако, в отличие от классической волны, волновое поле микрочастицы не действует независимо в каждой части пространства, в котором оно существует. Это можно уяснить, исследуя образование картины дифракции.

Рассмотрим, как образуется дифракционная картина при прохождении весьма разреженного пучка электронов через кристалл. Опыт показывает, что чередование темных и светлых полос на фотопластинке появляется не сразу, а по истечении некоторого промежутка времени. Каждый электрон, пройдя через решетку, дает отдельное темное «точечное» пятнышко. Только в результате действия множества электронов выявляется наличие периодичности в распределении этих пятнышек — они сливаются в чередующиеся темные и светлые полосы или круги. При этом существенно то обстоятельство, что характер дифракционной картины не зависит от плотности электронов в пучке. \downarrow

Таков же механизм образования дифракционной картины и при прохождении пучка света. Дифракция света происходит вовсе не так, как представляла себе этот процесс классическая волновая теория света; согласно волновой теории, дифракционные полосы появляются *сразу*

вследствие взаимодействия различных участков фронта волны. В действительности каждый фотон, попадая на фотопластинку, дает только «точечное» пятнышко, а совокупность всех фотонов, прошедших через дифракционную решетку, образует интерференционную картину.!

Наличие волновых особенностей у *каждой* микрочастицы доказывается тем, что разрешающая способность решетки зависит от общего числа щелей в ней. Это значит, что при прохождении каждого фотона или электрона через решетку на него влияют все щели решетки, т. е. структура поля не в одной точке пространства, а в области ее движения. Это было бы невозможно, если бы каждая микрочастица двигалась по определенной траектории, проходящей только через одну щель.!

Эта типично волновая особенность движения проявляется и тогда, когда мы имеем дело с одним электроном (например, в атоме водорода). «Согласованность» движения каждой частицы в каждый момент с полем в области пространства, в которой частица находится, проявляется в связанной системе — в атоме или молекуле — в квантовании стационарных состояний частицы. Подобно тому как в струне или мембране возможен лишь прерывный ряд стоячих волн (с дискретными частотами), так и в связанной системе возможен лишь прерывный ряд устойчивых движений микрочастицы, согласованных с ходом потенциала во всей системе.

Простейший случай связанного состояния — это движение частицы (в одном измерении) в прямоугольной «потенциальной яме» или «потенциальном ящике», т. е. области пространства, в которой действует связывающее поле.

Стационарные состояния электрона, запертого в «потенциальном ящике», описываются стоячими волнами, длина которых кратна ширине «ящика» l . Они образуют прерывный, дискретный ряд. Соответственно и возможные значения энергии электрона в этих состояниях образуют прерывный ряд; при этом существует наименьшая возможная энергия (E_0), называемая нулевой энергией.

Особый интерес представляет вывод о невозможности для электрона иметь энергию, меньшую нулевой. Уменьшить энергию электрона, связанного в области потенциаль-

ного ящика, можно лишь одним путем: «раздвигая» стенки потенциального ящика, т. е. увеличивая область локализации электрона, или область его связанности. С другой стороны, уменьшение области локализации электрона, и тем самым усиление связанности, имеет следствием возрастание нулевой энергии. «Стянуть» стенки потенциального ящика вплотную можно было бы только при увеличении нулевой энергии до бесконечности, что физически немыслимо. Существование нулевой энергии полностью подтверждается опытом.

Вместе с тем частица в каждом стационарном состоянии связанной системы обладает определенными значениями энергии, момента количества движения и проекции момента на заданное направление, т. е. определенными дискретными, корпускулярными свойствами.

Следует еще раз подчеркнуть, что волновой процесс при движении микрочастицы не адекватен распространению обычной волны. Какая-либо «часть» этой волны не может действовать независимо от других частей, как это имеет место, скажем, в волне на поверхности жидкости. Поэтому дифракционная картина и обнаруживается лишь как своеобразная *статистика* в результате действия множества независимых частиц, находящихся в одном и том же состоянии и в одинаковых физических условиях. Другими словами, волновые черты движения микрочастицы выявляются в результате действия многих частиц, хотя присущи они каждой частице в отдельности.

Таким образом, двойственная природа микрочастиц выражается в сочетании некоторых черт корпускулы и некоторых черт волны. Степень проявления той или другой стороны микрообъекта различна у разных микрообъектов и в разных условиях. Чем больше импульс частицы, тем резче выражаются корпускулярные свойства, свойства индивидуума. Волновые же черты обнаруживаются все слабее, а у макрочастиц практически не проявляются. Напротив, у очень длинных волн практически не проявляется свойство дискретности. Такова двойственная корпускулярно-волновая природа движения микрочастицы.

В соответствии с этими особенностями квантовая механика характеризует состояние движения микрочастицы

в каждый момент некоторой функцией (чаще координат или импульсов, в общем случае также времени), носящей название волновой функции. С помощью волновой функции, характеризующей данное состояние микрочастицы, можно определить вероятности всех возможных дискретных проявлений частицы в этом состоянии — вероятности различных мест ее локализации, значений ее импульсов и других динамических величин. Волновая функция (называемая часто ψ -функцией) позволяет находить распределение вероятностей проявлений каждого типа, их статистику.

Состояние свободного электрона, движущегося в отсутствие внешнего поля, в квантовой механике характеризуется плоской де-Бройлевской волной: в функцию плоской ψ -волны входят только определенное значение импульса и соответствующее значение кинетической энергии. Волновая функция, соответствующая данному состоянию свободного электрона, не содержит определенного значения координаты. Что же касается вопроса о местонахождении абсолютно свободного электрона в данный момент, то из волновой функции следует, что он может с одинаковой вероятностью обнаружиться вблизи любой точки пространства; значение вероятности определяется квадратом модуля волновой функции. Таким образом, волновая функция характеризует движение отдельного микрообъекта статистически, указывая лишь всю совокупность возможностей проявления его в данных условиях. В частности, плоская волна (немодулированная) описывает все возможные места локализации свободного электрона.

Однако представление об идеально свободном электро́не есть предельная абстракция, лишь весьма приближенно характеризующая его действительное состояние. Поэтому и характеристика состояния свободного электрона — плоская монохроматическая волна — есть предельная абстракция, сугубо приближенная. В природе не существует идеально монохроматических волн, простирающихся безгранично, не имеющих ни начала, ни конца в пространстве и во времени. Можно говорить лишь о большей или меньшей степени монохроматичности.

Действительная область пространства, в которой может произойти локализация электрона в каждый момент

(точнее, в достаточно малый отрезок времени), определяется расстояниями между частицами, во взаимодействии с которыми происходит движение электрона. Трек электрона в камере Вильсона, образуемый цепочкой капелек воды, дает крайне преувеличенное представление о размерах действительной области пространства, в которой в каждый момент локализуется свободная частица. Если же принять во внимание, что электрон, обладая лишь в среднем постоянным импульсом, в каждый момент находится в состоянии столкновения с какой-либо частицей среды, то более точной характеристикой такого состояния будет более сложная волновая функция, которая может быть представлена пакетом волн. Амплитуда такого волнового образования отличается той особенностью, что ее значение практически отлично от нуля в ограниченной области пространства, в остальной же части ее можно считать равной нулю. Свободная микрочастица (электрон), состояние которой характеризуется данным волновым пакетом, практически локализуется в пределах той области пространства, где амплитуда заметно отлична от нуля. Характеристика состояния посредством волнового пакета точнее отражает действительное движение свободных электронов, фактически всегда подвергающихся действию поля и поэтому локализованных в той или иной переменной, но конечной области пространства. Скорость распространения пакета — так называемая групповая скорость — совпадает со значением скорости электрона как частицы. Разумеется, и волновой пакет дает лишь приближенную картину «поведения» свободной частицы — для ограниченного отрезка времени. Это следует из факта распыливания пакета со временем.

Мы ограничимся приведенными здесь волновыми функциями. Рассмотрение их показывает, что в разных состояниях микрочастица обладает, вообще говоря, различными динамическими характеристиками. Так, свободная микрочастица, состояние которой характеризуется плоской ψ -волной, обладает определенным импульсом. Наоборот, связанная микрочастица (электрон в атоме) не обладает определенным значением импульса. Каждое из этих состояний может быть описано по-разному, с помощью различных статистик возможных проявлений

микрочастицы в данном состоянии. Определяется же наличие того или иного состояния теми физическими условиями, в которых микрочастица существует.

Теперь мы можем перейти к рассмотрению основной проблемы.

3. Двойственность природы движения микрообъектов приводит к необходимости анализа понятия «локализация микрочастицы в пространстве и во времени». Как уже было сказано, мы не можем приписывать движущейся микрочастице закономерное движение по определенной траектории, т. е. непрерывный ряд положений (координат пространства) и скоростей во времени. Движение свободной микрочастицы, характеризующееся плоской монохроматической волной, вообще не содержит никаких указаний о выделенной координате в каждый данный момент времени. И этот факт нельзя толковать в том смысле, что свободная частица с определенным значением импульса в каждый момент объективно находится в какой-то точке пространства; но мы не в состоянии определить эту точку. Если бы дело обстояло так, то у частицы не было бы волновых особенностей. Между тем дифракция микрочастиц, квантование состояний в микросистемах и множество других явлений доказывают, что волновые черты столь же объективно присущи микрочастице, как и корпускулярные. Следовательно, микрочастице самой по себе не присуще определенное местоположение (координата) в каждый момент времени, как это имеет место у классической материальной точки.

Но если дело обстоит так, то напрашивается иное понимание координаты, чем в классической физике. В самом деле, волновая функция состояния микрочастицы характеризует ту или иную степень ее локализованности лишь при условии нарушения монохроматичности волны. Можно сказать, что микрочастица оказывается локализованной в некоторой ограниченной области пространства лишь при условии, когда ее движение может быть представлено не как распространение монохроматической волны, соответствующей движению идеально свободной частицы, а как локальный «всплеск», как волновой импульс, волновой пакет.

При каких же условиях происходит такая локализация микрочастицы?

Очевидно, нарушение монохроматичности возможно лишь при ограничении ее распространения под влиянием внешнего воздействия на частицу. Другими словами, микрочастица приобретает определенную область локализации при взаимодействии с другим объектом.

Для того чтобы «локализирующий» объект мог служить «базисом отсчета» для микрочастицы, необходимо, чтобы при столкновении с ней локализирующий объект можно было считать практически неподвижным. А это возможно при условии, если масса объекта значительно больше массы локализуемой микрочастицы. Это означает, что определенная локализация микрочастицы может произойти лишь при столкновении ее с «квазиклассическим» объектом. Таким объектом при локализации электрона может служить, например, ядро или атом, с которым электрон сталкивается.

! Таким образом, понятие локализации в квантовой механике не совпадает с понятием координаты в классической физике; локализация микрообъекта обязательно предполагает взаимодействие его с «классической» частицей, а именно такое взаимодействие, которое ограничивает область движения микрочастицы, связывает ее в известных границах ¹⁾. Вне взаимодействия невозможно говорить об определенной координате микрочастицы. Поэтому мы говорим в дальнейшем только о *локализации* микрочастицы.

Взаимодействие определяет также величину области локализации.

Связь области локализации микрочастицы с взаимодействием может быть показана на основании соображения, что когда микрочастица длительно связана в определенной области, то она обладает при этом некоторой минимальной («нулевой») энергией, величина которой зависит от размера области, ограничивающей ее движение (от размера потенциального ящика). Чем уже потенциальный ящик, чем меньше область длительной локализации микрочастицы, тем больше ее нулевая энергия, которая стремится

¹⁾ Это обстоятельство не лишает нас права говорить об определенных размерах ядра (а тем более атома или молекулы) независимо от столкновения, поскольку мы можем их трактовать «квазиклассически».

к бесконечности при стремлении размера потенциального ящика к нулю.

Аналогично обстоит дело с локализацией микропроцесса во времени. Определенная координата «микрособытия» во времени предполагает выделение этого события в процессе взаимодействия. Локализация микроявления во времени также требует взаимодействия. Примером временной координаты может служить, например, прохождение волнового пакета. Чем уже пакет волн, чем резче выделен во времени волновой импульс, тем определеннее время его прохождения по «часам» базиса отсчета. Вне взаимодействия микроявление не обладает временной определенностью. Вопрос о локализации во времени приобретает в квантовой механике значение в связи с проблемой определения времени жизни квазистационарных состояний микросистем (атома, ядра и т. п.).

4. Понятие локализации в квантовой механике отличается от классического в очень важном отношении. Именно координата микрочастицы в реальных условиях всегда в той или иной степени неопределенна. Это означает, что в реальных условиях можно говорить лишь о той или иной *области локализации* микрочастицы, но не о *точечной координате*, что следует из основного положения квантовой механики — из соотношения неопределенностей. Согласно соотношению неопределенностей, чем больше область возможной локализации микрочастицы в каком-либо направлении q (область Δq), тем меньше неопределенность значения импульса частицы Δp_q ; и наоборот, чем больше неопределенность импульса, тем меньше область локализации. Соотношение неопределенностей записывается так: $\Delta q \cdot \Delta p_q \sim h$.

В соотношении неопределенностей мы встречаемся с необычными для классической физики понятиями неопределенной координаты и неопределенного импульса. В сущности, неопределенные физические величины встречаются и в классической физике. Например, «длина волны» в применении к монохроматической волне есть лишь приближенная характеристика последней, являющаяся в известной мере неопределенной. Однако неопределенная координата или импульс материальной точки в классической механике может иметь смысл лишь неточно измеренной

(в некоторых пределах) величины. В квантовой механике дело обстоит не так. Неопределенные, «размазанные» динамические величины являются объективными характеристиками микрочастицы, причем минимум неопределенности данной величины совершенно не зависит от точности измерения, а определяется только условиями существования частицы — теми условиями, которые определяют ее состояние. Чем сильнее связана микрочастица (длительно или кратковременно), тем меньше область локализации; а чем меньше область локализации микрочастицы, тем больше неопределенность ее импульса. !

Импульс в квантовой механике есть характеристика движения свободной частицы как целого. Неопределенность импульса означает невозможность отнести данное состояние движения именно к данной микрочастице, невозможность точно выделить ее движение как индивидуума. Таким образом, соотношение неопределенности имеет тот смысл, что чем сильнее связана частица с системой, чем она «локализованнее», тем неопределеннее ее динамическая индивидуальность. И наоборот, чем слабее привязана микрочастица к какой-либо системе, чем она свободнее, тем резче выступает ее динамическая индивидуальность, тем определеннее можно отнести движение именно к данной частице.

В процессе столкновения, когда частица связывается с другой, они образуют единую систему, хотя и короткоживущую. После столкновения, после того, как микрочастица освобождается от связи, распределение суммарного импульса между сталкивающимися частицами неоднозначно.

В этом проявляется двойственная природа микрочастиц. Ибо для классической волны локализация ее в какой-либо части пространства отнюдь не означает неопределенности ее динамических действий в этой области пространства, так как плотность энергии и импульса распределена по всему волновому образованию. С ψ -волной дело обстоит иначе. Поскольку определенность соответствующего ей импульса связана с определенностью длины волны, с монохроматичностью, а локализация волнового процесса означает нарушение монохроматичности, для нее имеет место соотношение неопределенности.

Согласно соотношению неопределенности, $\Delta p \sim \frac{h}{\Delta q}$.

При стремлении Δq к нулю, т. е. при «стягивании» области локализации в точку, импульс становится совершенно неопределенным.

Аналогичное соотношение имеет место для времени и энергии. Оно записывается так: $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$. Смысл этого соотношения заключается в том, что неопределенность ΔE энергии состояния связана с временем пребывания микрочастицы в данном состоянии, или с «временем жизни» этого состояния Δt . Чем определеннее энергия (чем меньше ΔE), тем больше Δt — длительность состояния, и наоборот.)

Следует подчеркнуть, что неопределенность энергии данного состояния отнюдь не противоречит закону сохранения энергии. Речь идет лишь о невозможности разделить энергию на определенные доли, принадлежащие частям связанного целого независимо друг от друга; энергия же системы, которую можно считать замкнутой, остается постоянной. ¹

Соотношениям неопределенностей разными авторами придавался различный физический смысл. Гейзенберг, который впервые сформулировал эти соотношения, вначале рассматривал их как соотношения неточностей результатов измерения координаты и импульса микрочастицы, соответственно — измерения времени (фазы) и энергии состояния квантового объекта.

С этой точки зрения микрочастице можно приписывать точечную координату или абсолютно точный импульс, но измерять эти величины одновременно, в одном опыте, невозможно вследствие принципиальной неконтролируемости взаимодействия между микрочастицей и прибором; предельно точное измерение координаты уничтожает возможность одновременного измерения импульса, и наоборот. Это устраняет возможность предсказать траекторию микрочастицы в будущем, после измерения. Мысленные опыты Гейзенберга, в которых он показывает, как, например, точное измерение координаты электрона при помощи жесткого фотона приводит к неопределенности угла, под которым фотон будет рассеян, и соответственно к неопределенности импульса электрона, хорошо известны. Что же

касается движения электрона до измерения, то, по мнению Гейзенберга, высказанному им в 1930 г., ничто не мешает нам предположить, что электрон двигался по определенной траектории, т. е. что у него объективно до измерения могут быть одновременно определенный импульс и определенная координата ¹⁾. Критика точки зрения Гейзенберга была дана рядом авторов ²⁾; однако подробное изложение этой критики выходит за рамки нашей темы.

Суть дела заключается в следующем. В действительности соотношения неопределенностей отнюдь не сводятся к соотношениям неточностей измерений, они отражают объективные свойства движения микрочастиц, обусловленные их корпускулярно-волновой природой. Рассмотрим, например, вопрос о местоположении электрона в атоме. Состояние электрона в свободном от внешних воздействий атоме описывается некоторой волновой функцией. Эта ψ -функция (точнее, квадрат ее модуля), как функция от координат, дает статистику возможных значений координаты электрона в атоме. Какой же смысл имеет здесь слово «координата»?

Формально рассуждая, координата электрона в атоме может быть определена сколь угодно точно. Но реально точность локализации электрона в пределах атома в каждый момент зависит от того агента, с которым электрон взаимодействует. Если атомарный электрон сталкивается с «мягким» фотоном (малой энергии и соответственно частоты), то электрон не может быть «обнаружен» в определенной части атома. Если атом зондируется быстрыми внешними электронами или жесткими фотонами (большой энергии), то область локализации атомарного электрона будет зависеть от возможного разброса импульсов зондирующих частиц. Минимальная область локализации электрона в атоме определяется максимальным импульсом зондирующих частиц на основании соотношения неопределенностей. Обнаружить электрон в точке в пространстве атома можно было бы только путем обстрела атома пучком частиц, содержащим частицы с бесконечно большими

¹⁾ В. Гейзенберг, Физические принципы квантовой теории, ГТТИ, 1932, стр. 21.

²⁾ См., например, Л. И. Мандельштам, Собр. соч., т. 5, Изд-во АН СССР, 1950, стр. 396 и сл.

импульсами (и соответственно бесконечно большой энергией); физически это невозможно. !

Таким образом, область локализации атомарного электрона зависит от взаимодействия его с зондирующим агентом, с внешними частицами, с которыми происходит столкновение. Вне столкновения нельзя говорить об определенной области локализации; предельное значение области локализации в данных условиях определяется на основании соотношения неопределенностей, и в этом заключается его объективный смысл.

Можно проиллюстрировать сказанное не только на атоме или атомном ядре; в современной физике высоких энергий производится также зондирование структуры отдельных элементарных частиц; к этому вопросу мы вернемся в дальнейшем.

Итак, из соотношения неопределенностей для координаты и импульса получается вывод, что абсолютно точное определение (измерение) координаты — точки в пространстве — физически невозможно. Ибо в природе не существует таких физических агентов, которые обладали бы бесконечно большими импульсами. Аналогичный вывод получается для момента времени. Вообще, как мы убедимся в следующем параграфе, длительная локализация электрона в области с линейными размерами, меньшими $\frac{h}{mc}$ (m — масса электрона, c — скорость света), является иллюзорной, поскольку при этом может происходить размножение частиц (рождение пар) даже в постоянном поле. Поэтому, строго говоря, можно применять лишь термин «область локализации».

Таким образом, координата микрочастицы всегда более или менее «размыта», неопределенна. Разумеется, в нерелятивистской квантовой механике малую область локализации можно рассматривать как точку, но это не значит, что область может реально быть «стянута» в точку.

Из соотношения неопределенностей для времени и энергии, как бы это соотношение ни толковалось, с необходимостью получается вывод, что точечное событие не может быть реально измерено. Для свободной частицы точечным событием является мгновенное столкновение с какой-либо другой частицей; это означает, что волновой пакет, харак-

теризующий состояние движущейся частицы, должен сжаться в точку, что требует бесконечно большой энергии частицы.

5. Реальная невозможность локализовать микрочастицу в точке пространства и времени не находит непосредственного выражения в аппарате квантовой механики. Формально рассуждая, состояние микрочастицы, локализованной в точке пространства, характеризуется так называемой δ -функцией:

$$\delta(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikx} dk;$$

наглядно говоря, волновая функция микрочастицы, локализованной в точке, есть волновой пакет, включающий волны с любой длиной волны, до бесконечно малых. Такой пакет — это бесконечно узкий «всплеск»; это соответствует утверждению, что измерить точечную координату микрочастицы можно только с помощью пучка зондирующих частиц, обязательно включающего частицы с бесконечно большими импульсами (и энергиями). Очевидно, что процессы столкновения частиц с очень большой энергией уже не могут быть предметом изучения нерелятивистской квантовой механики, поскольку число частиц при таких столкновениях не сохраняется; мы переходим здесь в область квантовой теории поля. Но в математическом аппарате нерелятивистской квантовой механики ограниченность ее применимости, разумеется, не находит отражения. Это обстоятельство выявляется только в более общей теории — в квантовой теории полей.

Указанное противоречие не обнаруживается, пока ограничиваются столкновениями малой энергии. В этом случае можно *приблизительно* рассматривать как точку такую область локализации, которая с помощью пучка частиц с ограниченным импульсом далее не может зондироваться. Математически говоря, мы заменяем здесь интеграл, выражающий δ -функцию и имеющий бесконечные пределы интегрирования (т. е. бесконечные значения волнового вектора k), аналогичным интегралом с конечными предельными значениями k .

В таком же смысле следует понимать утверждение, что квантовая механика допускает сколь угодно близкие

повторные измерения координаты ¹⁾. Наглядно это можно выразить так, что в квантовой механике можно измерить траекторию микрочастицы — непрерывную последовательность ее положений в пространстве ²⁾; отличие от классической механики усматривается в невозможности определить ее импульс в каждой точке траектории. Возможность повторного измерения координаты доказывается тем соображением, что микрочастица при измерении ее координаты не может приобрести бесконечно большую скорость и поэтому при повторном измерении координаты через сколь угодно близкое время будет получено почти то же значение координаты, что и при первоначальном измерении. Кроме того, поскольку энергия взаимодействия классического «прибора» с микрочастицей в нерелятивистской квантовой механике есть только функция координат, то координата тем самым принципиально определима в результате повторного измерения, т. е. взаимодействия микрочастицы с прибором (математически это выражают так, что оператор координаты коммутирует с оператором энергии). Но если предполагается, что микрочастица при измерении координаты не может получить бесконечно большой импульс, то тем самым — в силу соотношения неопределенностей — координата не может быть точечной, а «размытой» в известных пределах. Следовательно, «траектория» микрочастицы не будет непрерывной в классическом понимании этого слова; в действительности такая траектория представляет собой ряд весьма близко расположенных областей локализации, возникающих в результате ряда столкновений.

Аналогичное рассуждение можно провести и о локализации во времени. Оно приводит к таким же выводам.

6. Изложенная в предыдущем пункте трактовка локализации в квантовой механике отнюдь не является общепринятой. Широко распространено иное толкование квантовой механики, в котором понятие координаты трактуется в чисто классическом смысле. Сущность этих взглядов такова.

¹⁾ Л. Ландау и Е. Лифшиц, Квантовая механика, Гостехиздат, М.—Л., 1948, стр. 37.

²⁾ М. А. Марков, Гипероны и К-мезоны, § 34, Физматгиз, М.—Л., 1958.

Понятия и величины, применяемые в квантовой механике, в конечном счете являются классическими, макроскопическими. Причина этого коренится в том, что все приборы, которыми исследуются микрообъекты, на выходе эксперимента являются макроскопическими; другими они не могут быть, ибо люди — сами макроскопические объекты. Соответственно и все параметры, которые мы относим к микрочастицам, являются, в конечном счете, классическими.

Специфика микропроцессов состоит в том, что для описания их применима не вся совокупность параметров, которыми описываются движения классических объектов, а лишь часть их. Это объясняется тем, что вследствие атомизма действия применение одного класса макроприборов при исследовании поведения микрообъекта исключает возможность одновременного применения другого класса приборов. Именно применение класса приборов, с помощью которых можно измерить координату микрочастицы, в силу атомизма действия исключает одновременное применение класса приборов, с помощью которых можно измерить ее импульс.

Чем точнее мы можем измерить координату, тем менее точно можно одновременно измерить импульс, и наоборот. В наличии двух дополняющих друг друга классов приборов, каждый из которых вместе с тем ограничивает одновременное применение приборов противоположного класса, и состоит основное утверждение *принципа дополтельности* Н. Бора, который рассматривает этот принцип как физическую основу соотношения неопределенностей.¹

С данной точки зрения понятие координаты микрочастицы ничем не отличается от понятия координаты макрообъекта. Ибо приборы, которые позволяют измерять координату микрочастицы на выходе, обязательно макроскопичны. Можно, следовательно, говорить об ограниченной применимости классических представлений к микрообъектам, но, поскольку эти понятия применимы, они ничем не отличаются от понятий макроскопической физики.

Состояние микрообъекта характеризуется некоторой функцией распределения макроскопических параметров, которая описывает все возможные проявления микрочастицы в данных условиях.

Вопрос же о том, каковы параметры микрочастицы вне измерения ее прибором, в этой концепции считается лишенным смысла.

Отличие разделяемой нами точки зрения состоит в том, что она берет за основу специфическую особенность движения микрочастиц — их двойственную корпускулярно-волновую природу, которая присуща им объективно, независимо от того, изучаем мы микрообъект или не изучаем. Действительно, невозможно одновременно измерить координату и импульс микрочастицы. Но причина этого коренится в особенности поведения микрочастиц. Атомизм действия рассматривается не как выражение ограниченной возможности измерения, а как выражение основной закономерности, характерной для микрообъектов, а именно наличия общей связи между корпускулярными и волновыми проявлениями микрочастицы.

Разумеется, все, что говорится о наличии двух классов дополняющих друг друга приборов, верно. Однако ситуация заключается не в том, что принцип дополнительности лежит в основе соотношений неопределенностей, а наоборот, соотношения неопределенностей, являющиеся следствием двойственной природы поведения микрообъектов, обуславливают наличие дополнительных друг к другу классов приборов. Нельзя измерить координату микрочастицы в свободном состоянии потому, что в этом состоянии она не обладает определенным значением координаты, а обладает определенным импульсом. Состояние микрочастицы (а следовательно, ее параметры) определяется теми (достаточно устойчивыми) условиями, в которых она существует; условия эти описываются «квазиклассически». Однако это не означает, что динамические характеристики микрочастицы всегда *создаются* макроприборами.

Именно вследствие двойственной природы микрочастицы понятие «область локализации» отличается от понятия координаты макроскопического тела.

7. Анализ свойств поля (мы говорим пока о макроскопических свойствах) — если принять во внимание соотношения неопределенностей квантовой механики — показывает, что и понятие «точечной напряженности» физически неправомерно. В самом деле, уже в простейшем случае чисто электрического поля напряженность в данной точке опре-

деляется только через действие поля на пробное тело, несущее минимальный заряд. Таким телом является заряженная элементарная частица — электрон, протон, заряженный мезон с зарядом $\pm e$. Если заряд частицы равен ne , то частица является сложной и поэтому заведомо не точечной. Напряженность определяется через изменение импульса p во времени t посредством уравнения $\frac{dp}{dt} = eE$.

Поскольку импульс p и момент времени t неопределенны в некоторых пределах Δp и Δt , то и напряженность E имеет неопределенность $\Delta E \approx \frac{1}{e} \frac{\Delta p}{\Delta t}$. Из соотношения

неопределенностей следует, что $\Delta E_x \cdot \Delta x \cdot \Delta t \sim \frac{h}{e}$. То же справедливо и для напряженности магнитного поля, для компонент которого получается неопределенность, связанная с неопределенностями координат соотношением $\Delta H_x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta t \sim \frac{hc}{e}$.

Из этих соотношений следует, что напряженность поля является тем более определенной, чем больше область пространства и времени, к которым она относится. Другими словами, имеет смысл говорить только о «средней» напряженности поля в некоторой области, а не о напряженности в точке пространства и в определенный момент времени. Следовательно, и в теории поля точечная координата и момент времени не могут быть реализованы, измерены. В действительности мы всегда имеем дело только с малой, но конечной областью пространства и времени.

§ 17. «Точечное событие» в квантовой теории поля.

Идея нелокальности

1. Противоречивость понятия «точки пространства» и «мгновения» выявляется еще в большей мере, если рассмотреть подробнее представления об элементарных частицах и их взаимодействии, которые лежат в основе квантовой теории поля. Оказывается, что естественное для поля (близкодействия) понятие «точечного события» приводит к противоречиям и трудностям при применении его к взаимодействиям элементарных частиц,

Квантовая теория поля — это теория элементарных частиц. Главная особенность квантовой теории поля (в отличие от нерелятивистской квантовой механики) заключается в том, что она рассматривает элементарные частицы как возникающие и исчезающие при взаимодействиях, а их совокупности — как системы с неопределенным числом частиц и, следовательно, с неограниченным числом степеней свободы. Это дает основание рассматривать элементарные частицы как состояния соответствующих полей. Такой подход находится в соответствии с фундаментальным фактом, установленным за последние тридцать лет, что все без исключения элементарные частицы могут испытывать превращения, причем число частиц при их превращениях в общем случае изменяется.

В современной квантовой теории поле любого типа — электромагнитное, электронно-позитронное и другие — представляется как сложная колебательная (волновая) система, как набор «осцилляторов», каждый из которых совершает колебания определенной частоты. Энергия каждого осциллятора, согласно квантовой механике, может изменяться только дискретно. Увеличение энергии «полевого осциллятора» соответствует появлению (рождению) элементарной частицы данного вида с определенной энергией и импульсом; уменьшение энергии осциллятора — исчезновению частицы. Уравнения, описывающие изменения амплитуд поля в пространстве и времени, характеризуют специфику движения элементарных частиц данного вида, их массу и спин.

Таким образом, свободное (ни с чем не взаимодействующее) поле в квантовой теории представляется как «газ» соответствующих элементарных частиц: фотонов, электронов и позитронов, мезонов данного вида и так далее.

Рассмотрим несколько подробнее электромагнитное поле. В квантовой теории свободное электромагнитное поле представляется как «газ» фотонов, каждый из которых характеризуется определенными значениями энергии, импульса, поляризации, спином, равным единице, и массой, равной нулю. Фотоны распространяются со скоростью света. Однако фотону не приписывается определенный размер, т. е. ограниченная область локализации,

Для электромагнитного поля излучения имеет место соотношение неопределенностей $\Delta E \cdot \Delta n \sim E$, где E — напряженность поля, n — число фотонов, определяющее энергию поля в данной области. Смысл этого соотношения заключается в том, что чем более определена напряженность поля (чем меньше ΔE), относящаяся к данной точке пространства в данный момент времени, тем менее определена энергия поля (тем больше Δn) в области, расположенной вблизи этой точки. Значит, чем определеннее пространственно-временная картина поля, тем неопределеннее его энергетическая характеристика, и наоборот.

В поле, характеризующемся определенным распределением напряженностей, фотоны не могут быть локализованы в строго ограниченной части пространства.

Соотношение неопределенностей для поля приводит к заключению принципиальной важности. В электромагнитном поле, в котором фотоны отсутствуют ($\Delta n = 0$), напряженности поля отнюдь не равны нулю, а испытывают «нулевые колебания» — флуктуации (ΔE отлично от нуля). Таким образом, вакуум, в котором нет реальных квантов («частиц») излучения, не является пустотой в буквальном смысле слова. Отсюда следует вывод, что если в вакууме электромагнитного поля движутся заряженные частицы, например электроны, то на их движение должны влиять «нулевые» беспорядочные колебания напряженностей поля, совершающиеся в этом вакууме. Этот вывод квантовой электродинамики, казавшийся вначале весьма странным, получил в 40-х годах экспериментальное подтверждение; был обнаружен сдвиг уровней электронов в атомах, обусловленный тем, что под действием флуктуаций, совершающихся в вакууме электромагнитного поля и беспорядочно раскачивающих электрон, его средняя потенциальная энергия изменяется.

До сих пор речь шла о свободном электромагнитном поле. Но абсолютно свободное поле ни в чем не проявляется. Оно обнаруживает свое существование при взаимодействии с заряженными частицами, которые могут как излучать, так и поглощать фотоны, изменяя энергию соответствующей компоненты поля излучения. Поэтому полная картина поля должна включать также и его взаимодействие с заряженными частицами,

В самом деле, при поглощении фотона атомом (или другой системой заряженных частиц) увеличивается энергия системы, и, наоборот, при излучении фотона уменьшается ее энергия. Как же представить себе рождение фотонов за счет поля, связывающего заряженные частицы в атоме? Ответ на этот вопрос, который дает квантовая теория, заключается в следующем. Электромагнитное поле, связывающее заряженные частицы, также рассматривается как квантованное, но состоящее из «псевдофотонов», т. е. не из реальных фотонов, а из виртуальных, не «отпочковавшихся». С этой точки зрения взаимодействие заряженных частиц осуществляется благодаря непрерывному обмену «псевдофотонами»: каждая из частиц захватывает виртуальный фотон, испускаемый другой заряженной частицей. Аналогично можно представить и поле, связанное со свободной заряженной частицей. Собственное поле, неразрывно связанное с каждой отдельной заряженной частицей, рассматривается как результат непрерывного испускания и обратного поглощения частицей виртуальных фотонов, или как результат непрерывного обмена фотонами между частицей и вакуумом данного поля.

Понятие «виртуальной частицы» весьма своеобразно. С одной стороны, квантовая теория приписывает ей в сущности такие же свойства, как и реальной частице, и учитывает эти свойства при расчете любых явлений, в которых играет роль обмен виртуальными частицами. С другой стороны, «виртуальные частицы» рассматриваются только как возможные объекты, а отнюдь не как реально образовавшиеся, и поэтому предполагается, что процессы с их участием могут происходить с нарушением закона сохранения энергии, что невозможно для действительных объектов. Вся совокупность виртуальных частиц характеризует поле реальной частицы. Введение понятия о виртуальных частицах оказалось оправданным.

Квантовая теория электронно-позитронного поля, рассматривающая процессы рождения и аннигиляции этих частиц, строится по аналогии с квантовой теорией электромагнитного поля. Свободное электронно-позитронное поле также представляется как бесконечная совокупность гармонических осцилляторов, которым соответствуют электроны и позитроны в определенных состояниях, т. е.

обладающие определенными значениями энергии и импульса (или момента количества движения и четности), массы и половинного спина. Возбуждение данного осциллятора представляет собой рождение частицы в соответствующем состоянии, переход возбужденного осциллятора на низший уровень — исчезновение частицы в этом состоянии. Амплитуды функций гармонических осцилляторов рассматриваются как операторы, меняющие числа заполнения соответствующих состояний (с данной энергией и импульсом) на единицу. Так описывается процесс рождения или исчезновения электрона в данном состоянии (или соответственно исчезновение или рождение позитрона в этом состоянии). Таким образом, квантовая полевая теория рассматривает электроны и позитроны как возбуждения особого поля, т. е. в принципе так же, как рассматриваются фотоны в квантовой теории электромагнитного поля, с тем отличием, что первые подчиняются иному волновому уравнению, отражающему наличие у этих частиц половинного спина и массы покоя.

Это отличие электронов и позитронов от фотонов оказывается существенным еще в том отношении, что число фотонов, которые могут находиться в определенном состоянии («принадлежать определенному гармоническому осциллятору»), может быть произвольным; число же электронов и позитронов в каждом состоянии может быть равно лишь единице или нулю. Эта особенность находится в соответствии с принципом Паули в квантовой механике, согласно которому в каждом состоянии системы может находиться только один электрон.

Таково отличие электронно-позитронного поля от фотонного (электромагнитного). Пока речь шла только о свободном электронно-позитронном поле. Но такое поле также есть абстракция. В отличие от фотонов, электроны и позитроны обладают зарядом и поэтому всегда «сцеплены» с электромагнитным полем. Как и в классической электродинамике, взаимодействие электронов в квантовой теории считается точечным, т. е. происходящим в точке поля. Но в отличие от классической электродинамики, потенциалы поля рассматриваются не как числа, а как операторы, определяющие рождение и исчезновение соответствующих частиц. Следовательно, взаимодействие элек-

тронно-позитронного и электромагнитного полей в квантовой теории представляется как исчезновение электрона (или позитрона) и фотона в одних состояниях и появление их в других состояниях. Таким образом, взаимодействие электронно-позитронного и электромагнитного полей приводит лишь к переходам частиц из одних состояний свободных полей в другие, т. е. к их рассеянию; при этом возможно изменение числа частиц — их рождение и аннигиляция. Эта картина взаимодействия допустима потому, что связь электронно-позитронного и электромагнитного полей очень слаба; коэффициент связи (так называемая постоянная тонкой структуры) равен $1/137$. Малость взаимодействия и дает возможность описать его с помощью теории возмущений, в которой процесс взаимодействия описывается рядом, каждый последующий член которого соответствует переходу с участием большего числа виртуальных частиц, чем предшествующий.

Квантовая электродинамика успешно справилась с решением ряда задач, относящихся к взаимодействию электронов (и позитронов) с электромагнитным полем, в том числе и таких проблем, как рождение пар. Ее последовательная разработка привела к открытию вакуума электронно-позитронного поля.

Предположение о существовании вакуума электронно-позитронного поля следует из тех же соображений, что и допущение о вакууме электромагнитного поля. Линейные осцилляторы электронно-позитронного поля обладают нулевой энергией, которую невозможно рассматривать как формально входящую в теорию величину и попросту зачеркнуть, так как нулевая энергия не может быть устранена при рассмотрении взаимодействия полей. Таким образом, понятие вакуума и в данном случае относится к минимальному, или «нулевому», состоянию электронно-позитронного поля, в котором практически нет реально существующих (выделенных) частиц. В вакууме происходит непрерывное рождение и последующая аннигиляция пар, т. е. флуктуации заряда. Вследствие этого вакуум электронно-позитронного поля также влияет на реальные частицы системы и подвергается их влиянию.

Влияние реального электрона (позитрона) на электронно-позитронный вакуум получило название поляриза-

ции вакуума. Суть его состоит в том, что реальный электрон как бы поляризует заряды вакуума, плотность которых в отсутствие реальных электронов в среднем равна нулю; противоположные по знаку виртуальные заряды как бы притягиваются к реальному электрону, одноименные — как бы отталкиваются. Таким образом, «точечный» заряд электрона (или протона) создает в окружающей электрон области вакуума индуцированный распределенный заряд, который как бы передвигается вместе с ним. Тем самым точечный заряд электрона в вакууме экранируется, ослабляется. Происходит своеобразный квантовый обмен между индуцирующим (реальным) и индуцированным (виртуальным) зарядами; электрон как бы непрерывно «растворяется» в окружающей вакуумной среде и снова из нее возрождается. Так мы приходим к идее непрерывного «воспроизведения» электрона. Теория показывает, что нулевые колебания электромагнитного и электронно-позитронного вакуумов влияют друг на друга. Оба «вакуума» оказываются связанными.

Изложенные представления, лежащие в основе квантовой электродинамики, приводят к правильным результатам, согласующимся с известной совокупностью опытных данных. В частности, из них следует, что магнитный момент электрона вследствие поляризации вакуума, приводящей к образованию «вакуумных токов» вблизи центра электрона, должен иметь величину, отличающуюся от магнетона Бора. Эта разница в значении магнитного момента действительно была обнаружена экспериментально.

Эти представления существенно обогащают наши понятия о частице, ее движении и взаимодействии. Элементарная частица вещества оказывается неразрывно связанной с «вакуумом» полей, с которым она совершает непрерывный обмен. Электрон как бы окружен «атмосферой» виртуальных фотонов самых различных энергий; эта «атмосфера» и представляет его собственное поле. Определенной внешней границы такая атмосфера не имеет; виртуальные фотоны должны охватывать тем большие области пространства, чем больше их длина волны, т. е. чем меньше их энергия. Но чем больше энергия виртуальных фотонов, чем меньше их длина волны, тем меньше область пространства вокруг «центра симметрии» электрона, в которой они

существуют; соответственно меньше и их «время жизни» — время между испусканием псевдофотона и его поглощением. При приближении к центру симметрии поля электрона на расстояние порядка так называемой комптоновской длины волны, равной $\frac{h}{mc}$, когда энергия фотона оказывается порядка mc^2 (т. е. сравнимой с собственной энергией электрона), «строение» собственного поля электрона усложняется. Можно представить себе, что число виртуальных фотонов по мере увеличения их энергии возрастает. Кроме того, поскольку реальный фотон такой энергии может порождать электронно-позитронную пару, можно предположить, что в вакууме вокруг электрона в области пространства порядка комптоновской длины (10^{-11} см) за счет виртуального фотона возникают виртуальные пары электрон — позитрон. Электрон предстает, таким образом, как частица со сложной структурой, в виде различных слоев виртуальных частиц. Аналогично строится и квантовая теория других полей.

За последние годы, после открытия многих видов элементарных частиц (в особенности тяжелых частиц — барионов) и их превращений, началось экспериментальное исследование структуры нуклонов с помощью частиц высоких энергий. Особую роль сыграло открытие антипротона и антинейтрона. Выяснилось, что нуклон может распадаться на различные группы частиц; при обстреле протонов и нейтронов частицами высокой энергии, в несколько $B\bar{e}$, а также при аннигиляции пар нуклонов — антинуклонов рождаются не только пионы (π -мезоны), но и тяжелые K -мезоны и гипероны, и пары нуклонов — антинуклонов. Происходит и множественное рождение частиц. Это значит, что такая элементарная частица, как нуклон, обладает сложной структурой в том смысле, что его собственное поле не является простым полем одного типа, например мезонным, а представляет собой единое сложное поле, проявляющееся по-разному в областях разных «радиусов» в зависимости от энергии агента, зондирующего частицу. При облучении протона нежесткими гамма-лучами получается рассеянная волна от точечного заряда: протон проявляет себя как безразмерная точка, несущая элементарный заряд. Рассеяние достаточно жестких гам-

ма-лучей или электронов выявляет уже наличие аномального магнитного момента протона. Если обстреливать протон частицами очень высокой энергии, например электронами с энергией в полмиллиарда электроновольт, то наступают отклонения от точечности, начинает проявляться «электромагнитная структура» протона. Возникает представление об определенном распределении «плотности заряда» нуклона, характеризуемом его «формфактором». Наконец, при исследовании столкновений нуклона с пионами очень высоких энергий, в миллиарды электроновольт, еще более вырисовывается сложная структура этой частицы, которую десять лет тому назад многие рассматривали как точечную.

Разумеется, картина структуры нуклона, которую можно создать на основании опытов по рассеянию частиц, получается весьма опосредствованным путем и, по всей вероятности, включает такие элементы, от которых в дальнейшем придется отказаться. Тем не менее она представляет собой известное приближение к действительности.

Нуклон рассматривается как частица многослойной структуры. Если не говорить об электромагнитной атмосфере, то внешний слой собственного поля нуклона — это область виртуальных пионов. Размер этого пионного облака определяется комптоновской длиной волны пиона $\frac{h}{m_{\pi}c}$ (m_{π} — масса пиона), которая составляет величину порядка 10^{-13} см (область сильных взаимодействий). Время жизни виртуального π -мезона, согласно соотношению неопределенностей, $\sim 10^{-24}$ сек. Возможность рождения K -мезона, а также нуклонных пар приводит к заключению, что в центре нуклона должен существовать еще один слой размером порядка комптоновских длин этих частиц.

Вычисленные на основании изложенной картины распределения заряда и магнитного момента в протоне и нейтроне примерно соответствуют тем формфакторам, которые получаются из опытных данных о рассеянии быстрых частиц.

Разумеется, здесь также справедливо то замечание, которое было сделано выше в связи с виртуальным облаком фотонов. Мы характеризуем словами «облако виртуальных

нуклонных пар» или «облако виртуальных пионов» поле нуклона в соответствующих областях; это вовсе не означает, что в облаке нуклонных пар движутся реальные связанные пары нуклонов—antinуклонов; мы выражаем собственное поле нуклона через совокупность тех частиц, которые *могут* родиться при столкновении. Было бы неправильно считать, что, например, в облаке виртуальных пионов имеется строго определенное число связанных пионов, ибо при столкновении двух высокоэнергичных частиц может родиться различное число пионов и нуклонов, а частицы, испытавшие столкновение и породившие пионы, после столкновения сохраняют свои свойства. Вообще представление сложного поля как совокупности виртуальных частиц связано с определенным способом описания поля.

Вернемся к структуре нуклона. В изложенной картине предполагается, что облако пионов и K -мезонов окружает «голый» нуклон. Однако представление о «голой» частице с заданными свойствами неудовлетворительно. Различные виды элементарных частиц, будучи генетически связаны друг с другом, образуют единую систему, в которой каждый тип элементарных частиц занимает определенное место. Поэтому последовательная теория не может ограничиться описанием различных видов элементарных частиц уравнениями, в которых массы и заряды частиц являются заданными, взятыми из опыта величинами.

Изложенная «картина» элементарной частицы недостаточна и потому, что она не отражает также ограниченной применимости самих понятий частицы и поля. Наличие отдельных видов полей, сопоставленных всем без исключения известным видам элементарных частиц (а их около тридцати), весьма сомнительно. С другой стороны, понятие частицы явно неприменимо в тех случаях, когда она становится нестабильной и распадается за время взаимодействия частиц. Поэтому современная квантовая теория поля может считаться лишь предварительной схемой, а не последовательной теорией. Более того, эта теория сталкивается с такими трудностями, которые делают ее неприменимой даже при описании отдельных полей, сопоставленных мезонам и барионам. Эти трудности связаны с основным допущением квантовой теории поля — о точности взаимодействия.

2. Квантовая теория поля включает в себе глубокое противоречие, проистекающее из идеи «точечности» взаимодействия элементарных частиц. В современной квантовой теории поля предполагается, что взаимодействия различных полей — рождение и исчезновение их «возбуждений» (т. е. элементарных частиц) — происходит в точке пространства в момент времени. Отсюда получается физически бессмысленный вывод о бесконечности массы частицы, например, электрона.

Согласно квантовой электродинамике, собственная энергия электрона, движущегося в вакууме электромагнитного поля, обусловлена взаимодействием электрона с линейными осцилляторами этого поля. Взаимодействие выражается в наличии виртуальных переходов, заключающихся в том, что электрон непрерывно испускает фотоны и сам же их поглощает. А так как число виртуальных переходов (т. е. виртуальных фотонов, которыми электрон обменивается с осцилляторами вакуума) бесконечно, а значение энергий виртуальных фотонов (частот) также не имеет предела, то получается, что энергия взаимодействия электрона с вакуумом расходится (бесконечна). Если бы взаимодействие электрона с осцилляторами поля было бы не точечным, а происходило бы в конечной области пространства (и времени), скажем с линейными размерами l , то электрон не поглощал бы и не испускал бы фотонов с длинами волн, меньшими l ; энергия виртуальных фотонов в этом случае имела бы верхний предел. При точечном взаимодействии такого предела нет. Вероятность переходов для любого процесса излучения в высших приближениях при точечности взаимодействия теряет физический смысл.

При рассмотрении собственного поля нуклона приходится учитывать взаимодействие частицы с виртуальными мезонами любых энергий, и тогда мы получаем вывод о бесконечности массы нуклона, который является следствием основного допущения квантовой теории о точечности взаимодействия нуклона с вакуумным («нулевым») мезонным полем.

Помимо трудности бесконечностей, в квантовой электродинамике получается также физически бессмысленный вывод о том, что эффективный заряд электрона в вакууме должен быть равен нулю.

Таким образом, квантовая электродинамика дает разумные решения задач только в первом приближении. Чтобы получить правильные результаты в высших приближениях, приходится применять искусственные методы «отсечения» бесконечностей (методы перенормировки массы и заряда). Но перенормировка возможна только для полей, взаимодействие которых мало. Это — случай электромагнитного поля. Для электромагнитного поля доля, вносимая в энергию взаимодействия поля с электроном высшими членами разложения, характеризующими процессы со все возрастающим числом виртуальных фотонов, мала по сравнению с долей, вносимой низшими членами; это объясняется малостью коэффициента взаимодействия заряда с полем.

В случае же сильных (ядерных) взаимодействий, для которых связь заряда с полем велика (коэффициент связи порядка единицы), основной метод квантовой теории поля — теория возмущений, представляющая взаимодействие в виде ряда членов, — вообще непригоден. Это означает, что с помощью квантовой теории поля вообще невозможно рассчитывать различные реакции с участием элементарных частиц.

Между тем точечность взаимодействия является основным требованием квантовой теории поля, совместимой с теорией относительности.

Релятивистская инвариантность функции взаимодействия электрона с полем несовместима с представлением о протяженном электроны — ни деформируемом (это противоречило бы элементарности), ни недеформируемом (это противоречило бы требованию конечной скорости передачи любых действий, в данном случае в пределах электрона).

Отказ же от релятивистской инвариантности представляется необоснованным потому, что основанная на ней теория всех известных явлений — рассеяния частиц, тормозного излучения, рождения пар и других, для расчета которых можно ограничиться первым приближением, — полностью подтверждается опытом вплоть до энергий в сотни *Мэв*.

Необходимо подчеркнуть, что признание точечности взаимодействия отнюдь не равносильно представлению о бесструктурности элементарных частиц, как это иногда

утверждают. Мы убедились, что квантовая теория поля приводит к заключению о структурности элементарных частиц, о наличии у них сложной «атмосферы», о многоступенчатости процесса взаимодействия. Но элементарный акт взаимодействия, заключающийся в рождении (или поглощении) виртуальной или реальной частицы, считается мгновенным и происходящим в точке пространства, где находятся в данный момент точечные «голые» частицы. И именно это представление порождает трудности в квантовой теории полей.

Каков же путь преодоления этих трудностей? Нужна ли радикально новая теория, основанная на отказе от современных основных понятий квантовой теории, или же преодоление трудностей теории элементарных частиц не требует радикальной ломки существующих понятий?

Согласно одной точке зрения, трудности современной квантовой теории полей проистекают от несовершенства ее математических методов. Метод возмущений, применявшийся в квантовой теории поля, стремился раскрыть механизм действия поля последовательно во времени и пространстве, а это оказывается невозможным. Действительная же задача теории, согласно этой точке зрения, заключается только в том, чтобы предсказать вероятности тех или иных реакций, — другими словами, по заданным до взаимодействия параметрам частиц и их динамическим характеристикам определить вероятности появления в результате взаимодействия определенного числа других (или таких же) частиц с заданными параметрами и импульсами. Детальный механизм взаимодействия остается при этом вне рассмотрения. Это — метод так называемой матрицы рассеяния, предложенный в 1943 г. Гейзенбергом и наиболее последовательно осуществленный в методе дисперсионных соотношений.

При этом представление о полевым механизме взаимодействия сохраняется лишь постольку, поскольку обычно предполагается локальность (т. е. точечность) взаимодействия.

Мы не можем здесь входить в рассмотрение этого метода. Заметим лишь, что необходимость требования локальности взаимодействия в методе дисперсионных соотношений отнюдь не доказана. Главное же заключается в том,

что в методе дисперсионных соотношений по-прежнему массы и заряды элементарных частиц должны быть заданы; следовательно, его нельзя считать последовательной теорией, способной описать всю совокупность различных видов элементарных частиц и их взаимопревращений. По существу это метод решения отдельных задач, возможно позволяющий обходить трудности, но не разрешать их.

Другое направление в современной теории элементарных частиц стремится преодолеть трудности квантовой теории полей более радикально — путем поисков более адекватной картины взаимодействия элементарных частиц.

3. Выход из трудностей квантовой теории полей пытались найти путем отказа от представления о «точечном» взаимодействии. Предлагается концепция нелокализованного поля, согласно которой величины, характеризующие действия поля, относятся к пространственно-временной области, но не к мировой точке в буквальном смысле слова. Для этой цели в теорию вводится величина, характеризующая минимальную область действия поля. Идея нелокализуемости разрабатывалась рядом исследователей, начиная с 30-х годов нашего века.

Исходное допущение теории нелокализованного поля было сформулировано в виде соотношения неопределенностей для потенциала поля и координаты частицы, смысл которого заключается в том, что в пределах пространственно-временной области с линейными размерами, имеющими порядок величины l , неопределенность потенциала поля ΔA оказывается порядка величины самого значения потенциала. Другими словами, в пределах такой области понятие поля (характеризуемого определенными значениями потенциала) теряет физический смысл.

Предполагается, что величина l , определяющая предельно малые размеры пространственно-временной области поля, характерна для данного типа частиц (четырёхмерно протяженные частицы). Полагая l равной нулю, т. е. переходя к точечной частице, мы снова получаем обычную квантовую теорию полей.

Из существования «элементарной длины» для данного типа частиц следует, что в пределах минимального времени l_0 не имеет смысла понятие фазы. Разность фаз и свя-

занное с ней понятие напряженности поля не могут применяться в пределах минимальной пространственно-временной области. Очевидно, теряет смысл и понятие частоты волны в пределах этой области. Естественно поэтому, что трудности обычной полевой теории, обусловленные предполагаемыми взаимодействиями с квантами поля очень большой частоты (стремящейся к бесконечности), не должны иметь места в нелокальной теории поля. В связи с этим исчезают расходимости. Таким образом, нелокальная теория поля вносит глубокие изменения в физические представления о пространстве и времени. Обычное понятие точечного события считается приближенным. Событие не есть лишенная размеров мировая точка, а конечная область в пространстве и времени. Эта область может иметь разный минимальный объем в различных полях, но она не точечна.

Вплоть до 50-х годов нелокальность вводилась в существующую квантовую теорию поля в виде постоянного формфактора. Если представить поле, действующее на элементарную частицу, в виде интеграла Фурье (бесконечной суммы плоских волн), то отдельные слагаемые умножаются на величину, являющуюся некоторой определенной функцией импульсов. В сумме (интеграле) это даст конечную область действия поля и соответственно устранение расходимости. Однако такой способ введения нелокальности является неудовлетворительным, поскольку производится чисто внешнее сочетание разнородных и противоречащих друг другу элементов теории: уравнений поля, основанных на представлении о воздействиях, передающихся с конечной скоростью от точки к точке, и частиц определенного «размера», определяемых постоянным формфактором. Другими словами, делается попытка сочетать согласующееся с теорией относительности представление о непрерывно распространяющемся процессе с представлением о твердой частице, в пределах которой сигнал может передаваться с бесконечной скоростью. Это приводит к тому, что дифференциальные уравнения поля несовместны, т. е. не имеют решений. Это означает, что в действительности такое взаимодействие не реализуется.

Была сделана попытка отказаться от релятивизма в «малой области». И это допущение приводит к математи-

ческим трудностям¹⁾. Главное возражение заключается в том, что если отказаться от релятивизма «в малом», то неясно, как получить его «в большом».

Это показывает, что представление о «твердой» частице несостоятельно. Оно не учитывает также очень важных обстоятельств — сложности частиц и единства различных полей. Именно в силу взаимной связи полей «механизм» воздействия поля на частицу может качественно изменяться при переходе к очень большим энергиям.

Было высказано и другое возражение. Поскольку нелокальность, как показал Юкава, выражает сложность элементарной частицы и наличие в ней внутренних степеней свободы, было бы нелогично предполагать, что ее размер является постоянным.

По изложенным соображениям и возникла идея фактора, деформируемого под влиянием внешних воздействий (М. А. Марков). Отсюда вытекает важное следствие: чтобы элементарная частица, обладающая наименьшим зарядом данного типа, могла деформироваться под действием внешнего поля, ее «элементы» должны быть связаны внутренним полем другого типа. Очевидно, деформация возможна только в том случае, если внешнее поле и внутреннее связаны.

Сложность задачи о поведении такой частицы привела к попыткам ее решения в упрощенном виде. К таким попыткам можно отнести представление элементарной частицы как системы из двух точечных частиц, связанных внутренним полем, движения которых квантованы. Внешнее поле действует на одну из частиц, которая затем передает это действие сложной частице в целом. Противоречивость такого образа элементарной частицы заключается в том, что точечность не исключается, а отодвигается, относится к «субчастицам». При решении такой задачи возникают трудности; например, в некоторых вариантах получался уменьшающийся спектр масс при переходе сложной частицы в более высокие возбужденные состояния, что явно бессмысленно.

Принципиально новый шаг в трактовке нелокального взаимодействия был сделан М. А. Марковым в последние

¹⁾ М. А. Марков, ЖЭТФ 21, 11, 1951.

годы. Основное в этой новой идее заключается в статистической трактовке координаты пространства и времени ¹⁾. Как отмечено выше, квантовая механика формально допускает существование волновых пакетов сколь угодно малых размеров (т. е. формальную возможность локализации микрообъекта в точке), возможность произвольно точной локализации событий во времени, наконец, возможность повторной сколь угодно частой измеримости координаты. Это равносильно признанию сколь угодно малых «квазитвердых» масштабов и сколь угодно малых равномерно идущих часов. Однако эти требования не основаны на реальных экспериментах. Напротив, можно предположить, что «в пределах» элементарной частицы эти требования не могут быть удовлетворены.

Основное допущение, которое делается Марковым в этой последней концепции нелокальности, заключается в том, что максимально точное измерение координаты q дает определенный статистический разброс ее значений вокруг некоторого среднего значения x ($q = x + \xi$, где ξ — отклонение q от x). При измерениях мы получаем определенную функцию распределения $\chi(\xi)$. Повторные серии измерений также дают ту же функцию. Реальное пространство q не является метрическим, так как квадрат длины здесь не является определенным; только пространство x обладает метрическими свойствами. Функция $\chi(\xi)$ характеризует статистику случайных малых отклонений от метричности. При этом она вообще не совпадает с обычной волновой функцией микрочастицы, поскольку последняя зависит от «классического» поля, в котором она движется. Однако естественно потребовать, чтобы минимально возможный волновой пакет (минимальная область локализации частицы) совпадал с $\chi(q)$. Из условия минимальности пакета получается определенное выражение для $\chi(q)$, которое можно записать в релятивистски инвариантной форме. Разумеется, минимальная координатная область включает и область разброса временной координаты.

Статистическая трактовка нелокальности, в противоположность предыдущим, не вступает в противоречие

¹⁾ М. А. Марков, Гипероны и К-мезоны, Физматгиз, М.—Л., 1958.

с релятивизмом, поскольку теория относительности рассматривает только метрическое пространство x .

Можно сделать еще одно допущение, которое является совершенно независимым, а именно что для элементарных частиц разной массы значения минимального пакета образуют закономерный ряд. Это означало бы, что имеется соответствие между спектрами масс элементарных частиц и минимальными «координатными областями». Таким образом, делается попытка связать новое статистическое понятие координаты со структурой элементарных частиц.

4. Одновременно с идеей нелокальности взаимодействия разрабатывалась гипотеза о квантовании пространства и времени. Мысль о дискретной структуре пространства и времени, о существовании неделимых далее элементов пространства и времени, высказывалась еще в древности; она была навеяна, с одной стороны, атомистическим учением о веществе, с другой, анализом противоречивой сущности движения (в частности, известными апориями Зенона). Однако идея дискретности пространства и времени не находила поддержки среди преобладающей части естествоиспытателей и математиков до нашего века. Она была чужда и ньютоновой механике, и геометрии, основанных на представлении об абсолютной непрерывности.

Вопрос о возможности дискретной структуры пространства был вновь поставлен в прошлом веке Риманом в его лекции «О гипотезах, лежащих в основании геометрии». Как уже было отмечено выше, Риман связывает вопрос о конечной структуре пространства с природой материальных взаимодействий в малых областях. При этом он допускает также возможность того, что «то реальное, что создает идею пространства, образует дискретное многообразие». Если пространство в конечном счете дискретно, то, утверждает Риман, «принцип метрических отношений содержится уже в самом понятии этого многообразия, тогда как в случае непрерывного многообразия его следует искать где-то в другом месте»; в этом случае «нужно постараться объяснить возникновение метрических отношений чем-то внешним — силами связи, действующими на это реальное». Решить эту дилемму может только физика будущего. Другими словами, Риман полагал, что дискретность простран-

ства возможна лишь в том случае, если пространственные отношения не определяются «силами связи», т. е. полем.

Мысль о дискретности, квантованности, пространства и времени возродилась в 20-х годах нашего века, после открытия кванта действия и создания квантовой теории. Такие высказывания встречаются уже в последних работах Пуанкаре и Томсона. Поскольку электрон есть элементарная частица, классический радиус которой r_0 уже в то время принимался равным 10^{-13} см, можно было предположить, что такая длина является наименьшей в природе — квантом пространства — и соответственно квантом времени следует считать отношение $\frac{r_0}{c} \sim 10^{-23}$ сек. Вопрос о квантовании пространства и времени был вновь поднят В. А. Амбарцумяном и Д. Д. Иваненко ¹⁾ в 1930 г. в связи с проблемой расходимости собственной энергии электрона. Можно сделать предположение, что пространственные координаты могут принимать лишь целочисленные значения, кратные некоторой минимальной длине a . Отсюда, далее, следует предположение о минимальном четырехмерном (пространственно-временном) объеме $\frac{1}{c} a^4$. В этом случае энергия собственного поля («самодействия») электрона будет порядка $\frac{e^2}{a}$.

Квантованное пространство-время имеет как бы зернистую структуру, типа кристаллической решетки. Попытки разработать геометрию такого дискретного мира были сделаны Мархом, Снайдером и другими. В последние годы появились также исследования (Коиш, И. С. Шапиро), в которых пространство-время рассматривается как состоящее из конечного числа «точек». Однако эта концепция очень мало разработана.

5. С другой точки зрения проблема «наименьшей части» пространства-времени была поставлена Гейзенбергом в его работах по единой теории элементарных частиц ²⁾.

¹⁾ В. А м б а р ц у м я н и Д. И в а н е н к о, Zeitschrift der Physik 64, 563, 1930.

²⁾ См. сб. «Нелинейная квантовая теория поля», ИЛ, М., 1959.

Представление об элементарной частице, которое было изложено выше, имеет весьма существенный недостаток: элементарная частица непосредственно не рассматривается как один из видов материи в целом, единство всех видов элементарных частиц непосредственно не находит выражения. В самом деле, хотя структура элементарной частицы и включает многие виртуальные материальные образования, характеризующие ее собственное поле, но тем не менее важнейшие свойства частицы — ее масса и заряд — задаются, но не получаются теоретически. Центр симметрии частицы представляется как «голая» точка, окруженная многослойной «шубой» из различных виртуальных частиц; так, центром протонной модели является «голый» протон, окруженный «шубой», состоящей из слоев виртуальных нуклон-антинуклонных пар, виртуальных K -мезонов, виртуальных пионов; в центре модели электрона оказывается «голый» электрон, также прикрытый «шубой» виртуальных частиц. Массы же этих частиц входят в уравнение соответствующих полей как заданные величины. Исходное уравнение поля — это уравнение свободной частицы; связь с другими полями задается взятыми из опыта константами элементарного электрического заряда, ядерных зарядов и т. д. Между тем опыт свидетельствует о генетическом единстве всей системы элементарных частиц. Попытки построить единую теорию полей предпринимались уже давно, но они в течение ряда лет не приводили к значительным результатам.

Идея, сформулированная в работах Гейзенберга, опубликованных во второй половине 50-х годов, заключается в том, что в основу теории поля должно быть положено единое нелинейное уравнение.

Нелинейность уравнения дает возможность отобразить самовоздействие единого поля, образование системы относительно выделенных частиц из единого поля; другими словами, это должно быть общее уравнение элементарных форм материи, связанных не с «набором» разных вакуумов (электромагнитного, электронно-позитронного, нуклонного и так далее), а с «миром» в целом. Вместе с тем это уравнение должно охарактеризовать полноту элементарных видов материи; из него должен получаться спектр масс всех элементарных частиц, из него должны

получаться также значения зарядов, связывающих частицу с «миром».

Гейзенберг полагает, что такая полнота системы элементарных частиц может быть выражена общим нелинейным уравнением единого спинорного поля, причем в уравнение входит кроме двух известных универсальных постоянных — кванта действия и скорости света — еще и третья универсальная постоянная — наименьшая четырехмерная «длина». Это значит, что должно существовать наименьшее пространственное расстояние l_i ($i = 1, 2, 3$) и наименьшая длительность l_0 . Поскольку четырехмерная длина сопряжена с четырехмерным импульсом, то это допущение с необходимостью приводит к существованию элементарной частицы с наибольшей массой и процесса с наибольшим импульсом. Таким образом, наличие предельно малых величин пространства и времени в теории Гейзенберга рассматривается не просто как способ преодоления расхождений в существующей квантовой теории поля, придуманный для данного случая, а как естественный составной элемент единой теории «мира» элементарных частиц.

Указанное допущение предполагает, что представление о меньшей части пространства и времени, чем l_i , не имеет физического смысла; l_i и l_0 — это физическая «точка» пространства и физический «момент» времени. Внутри четырехмерного объема событий не происходит.

Правильность идеи Гейзенберга может быть проверена в конечном счете только экспериментом. Однако даже в случае ее подтверждения представляется рациональным предположить, что единая система элементарных частиц также должна зависеть от условий, существующих в мире в целом, что в зависимости от условий в той или иной части вселенной может измениться вся совокупность значений масс элементарных частиц, даже если отношения масс разных частиц останутся неизменными. Это значит, что и наименьшие доли пространства и времени могут быть различными в разных областях вселенной; пространство и время могут быть деформируемыми. Такое допущение делается в одной из последних работ Гейзенберга с сотрудниками.

Наконец, и сама система элементарных частиц может оказаться отнюдь не последней замкнутой системой материальных образований в природе. Де Бройль и его сотрудники в течение ряда лет пытаются создать модель элементарной частицы как «релятивистской капли», формируемой из субмикроскопических элементов материи. Не входя в рассмотрение этих попыток, можно сказать, что сама идея существования качественно различных уровней материальных образований представляется обоснованной.

6. Подведем итоги нашего рассмотрения понятия «события». Вопрос о существовании точечного события (в буквальном смысле слова) сводится к вопросу о существовании бесструктурного явления, которое само по себе лишено протяженности и длительности. Если такие события существуют, то тела и процессы могут иметь абсолютные границы в пространстве и во времени. Конец одного процесса и начало другого, граница между ними и есть точечное событие (или набор таких событий). Но если всякий процесс сводится к бесконечной совокупности таких событий, то возникают неизбежные трудности.

Атомизм заряда, а в особенности атомизм действия вступили в противоречие с идеей точечного события. В квантовой механике выяснилось, что у микрообъектов вообще не существует точно определенных пространственных и временных границ. Идея абсолютной «внеположности» (по выражению Гегеля) тел и процессов оказалась не соответствующей действительности. Частица выделена лишь относительно; то же справедливо и для явления. «Точечное событие» оказалось абстракцией, применимой лишь постольку, поскольку при данном взаимодействии не проявляется структура объекта. Но при другом типе взаимодействия объект непосредственно или косвенно окажется структурным; тогда его невозможно рассматривать как «точку». Стремясь все более точно «нащупать» точку в пространстве или во времени, мы в конце концов либо обнаруживаем, что «точка» структурна — следовательно, протяженна, — либо вообще ее ликвидируем, превращая единичный микрообъект, физически реализующий эту «точку», в множество микрочастиц, т. е. опять-таки «размазывая» точку в пространстве и во времени.

Квантовая теория поля, исходя из идеи точечности взаимодействия (т. е. точечности события), в конце концов приходит к выводу о структурности микрочастицы. Но этот вывод противоречит исходной идее, и это противоречие проявляется в изложенных выше трудностях, с которыми сталкивается квантовая теория полей. Обнаруживается, что процесс взаимодействия, в котором происходит формирование частиц, не может быть последовательно описан на основе представлений о рассеянии «готовых» частиц, соответствующих набору свободных полей с заданными свойствами. Процесс превращения одних частиц в другие вообще является многоступенным, и далеко не всегда каждая ступень может рассматриваться как особая нестабильная частица. Интересно в этой связи отметить, что открытая в самое последнее время нестабильная частица имеет время жизни всего лишь 10^{-21} сек, что всего на два порядка превышает так называемое ядерное время жизни $\sim 10^{-23}$ сек, за которое предельно быстрый «сигнал» проходит по нукло-ну. По-видимому, еще менее стабильные образования вряд ли можно рассматривать как частицы с определенными свойствами. Свойства таких образований явно не укладываются в известные рамки вследствие неопределенности их времени жизни и области локализации. Возможно, что здесь найдет применение идея статистического пространства-времени, предложенная Марковым.

Можно также утверждать, что одна из возможностей, на которую указывал Риман — дискретность пространства и времени сама по себе, абсолютная их дискретность, — столь же нереальна, как и абсолютная непрерывность. Свойства пространства и времени не независимы от свойств материи, а определяются общими свойствами материальных связей в мире, зависят от «сил». Поэтому естественно полагать, что квантование пространства и времени, если оно и имеет место, может быть только относительным, зависящим от общих условий в данной части мира.

ГЛАВА V

СВОЙСТВА СИММЕТРИИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

§ 18. Проблема трехмерности пространства. Необратимость времени

1. Анализируя понятие координаты пространства и времени, мы обсуждали свойства простейших частиц и явлений, физически реализующих «точки» и «мгновения» в окружающем нас мире. К наиболее общим характеристикам пространства и времени в целом относятся свойства симметрии. Применительно к пространству речь идет прежде всего о совокупности таких преобразований его элементов, в результате которых части пространства — геометрические тела — сохраняют свою целостность. Это переносы тела в целом, вращения (повороты), комбинации переносов и поворотов — винтовые движения, наконец, зеркальные отражения.

К проблемам симметрии пространства и времени, обсуждавшимся еще в древности, относится вопрос о числе измерений пространства и времени. Как понять трехмерность пространства и одномерность времени, известные из повседневного опыта? С чем эти общие свойства связаны?

С точки зрения ньютоновой концепции (в частности, и предшественников Ньютона) следует признать, что сама постановка вопроса не обоснована. Поскольку пространство и время рассматриваются как изначальные, их общее свойство — число измерений — также изначально и ни с чем не связано. Можно говорить лишь о тех или иных проявлениях этого свойства в геометрии или в механике.

Так, Галилей усматривает проявление трехмерности пространства в том факте, что через каждую точку можно провести только три взаимно перпендикулярные линии. Другими словами, можно только констатировать на опыте факт трехмерности пространства.

В концепции пространства и времени как форм существования материи трехмерность пространства и одномерность времени должны быть необходимо связаны с наиболее общими свойствами движения и взаимодействия тел. Это прежде всего означает, что в окружающем мире не могут существовать материальные объекты с числом измерений, меньшим или большим трех. Лейбниц еще не ставил так вопрос. Его суждения о трехмерности пространства ничем не отличаются от взглядов ньютоналинцев. Однако другие сторонники этой концепции не ограничивались чисто геометрическим обоснованием трехмерности пространства, а искали связь между этим свойством и общими свойствами физических тел и явлений. Так, еще Аристотель обосновывал трехмерность пространства тем, что тело полностью определено тремя величинами — длиной, шириной и высотой. Тело делимо на части двухмерной поверхностью, поверхность — одномерной линией, линия — нульмерной точкой. Следовательно, число «три» полностью исчерпывает измерения тела; объекта с большим числом измерений не существует. Вместе с тем Аристотель приводил также доводы пифагорейцев о совершенстве числа три.

Кант в докритический период своей философии, когда он еще примыкал к лейбницевоу трактовке пространства, связывал трехмерность пространства с законом действия сил всемирного тяготения, убывающих пропорционально квадрату расстояния. Если бы сила всемирного тяготения убывала пропорционально расстоянию, то пространство было бы двухмерно; вообще, в n -мерном пространстве сила тяготения убывала бы по закону $\sim r^{n-1}$.

Однако эти доводы не оказали влияния на решение вопроса о трехмерности пространства, поскольку в дальнейший период естествознания и философии ньютонова концепция пространства и времени стала господствующей и проблемой трехмерности пространства интересовались весьма немногие исследователи.

Как уже указывалось, вплоть до конца 19 века имели широкое распространение кантианские взгляды на пространство и время как на априорные формы восприятия явлений. Для сторонников кантианства свойства симметрии пространства (и времени) обусловлены не поддающимися разгадке особенностями человеческого сознания и, следовательно, не могут быть предметом изучения. Даже такой исследователь, как Гельмгольц, сумевший вскрыть глубокую связь между геометрией и физикой, утверждал, что трехмерность пространства следует приписать особому характеру наших чувственных восприятий; четвертое же измерение, даже если оно существует, не может быть нами воспринято вследствие «организации нашего тела».

В противоположность идеалистам, последовательные материалисты всегда рассматривали трехмерность пространства как объективный факт, связь которого с другими свойствами мира должна быть раскрыта наукой. И действительно, с конца 19 века начинается новый этап в научном анализе проблемы размерностей.

Вопрос о возможности обоснования трехмерности пространства привлек внимание в связи с развитием аффинной и проективной геометрий, а также созданием геометрии обобщенных пространств многих измерений. Плюкер показал, что размерность пространства (в общем смысле слова) может быть различной в зависимости от выбора элементов, из которых построено пространство. Так, например, если в качестве «элемента» пространства выбрать круг, то плоскость в евклидовом пространстве окажется трехмерной (для определения круга требуется задание трех величин — радиуса круга и положения его центра на плоскости). В дальнейшем Кантор показал, что возможно установить взаимно однозначное соответствие между точками линии и точками плоскости; отсюда можно было сделать вывод, что размерность пространства — величина условная, которая может изменяться при взаимно однозначных отображениях. В связи с этим и возник вопрос о более точном определении размерности и обосновании трехмерности реального пространства.

Важнейший результат исследований понятия размерности в этот период был получен Брауэром. В своей

работе 1913 г.¹⁾ он установил, что размерность евклидова пространства есть топологический инвариант — число, не изменяющееся при непрерывных и взаимно однозначных преобразованиях. Этот результат имел важное принципиальное значение.

Пуанкаре сделал попытку обосновать трехмерность реального пространства чисто геометрическим способом²⁾. Что означает наличие трех измерений пространства? Пуанкаре на это дает ответ, близкий к тому, который давал Аристотель. Чтобы разделить пространство на части, его надо рассечь поверхностями; разъединить части поверхности друг от друга можно посредством линий; наконец, линии пересекаются на части точками. Но дальше идти невозможно, точку разделить невозможно, точка не есть множество. Таким образом, линия есть множество одного измерения, поверхность — двух измерений, пространство — трех измерений. Следовательно, пространство в целом имеет три измерения. Но число измерений реального пространства есть инвариант. Поэтому нельзя получить число измерений пространства, отличное от трех.

В этот же период начинаются усиленные поиски связей между числом измерений пространства и свойствами тел и частиц, образующих окружающий нас мир. Так, движение простейшей неизменной системы частиц — твердого тела — исчерпывается переносами и поворотами, посредством которых оно приходит в контакт с другими телами. Если бы пространство было одномерным, то одномерное же твердое тело (бесконечно тонкий стержень) представляло бы звено в непрерывной цепи таких тел и могло бы совершать только продольные колебания.

Если бы пространство было двухмерным, то двухмерное твердое тело могло бы прийти в контакт с любым другим таким же телом с помощью переноса в двух направлениях, но его вращения в каждом месте происходили бы вокруг одной оси. Только при условии трехмерности пространства число степеней свободы для переноса и для вращения совпадает — оно равно трем. Таким образом, три

¹⁾ L. B r o w e r, Über den natürlichen Dimensionsbegriff, J. reine u. angew. Math. 142, 486, 1913.

²⁾ H. P o i n c a r é, Revue de métaphysique et de morale, 20, 486, 1912.

измерения пространства являются тем числом, при котором может осуществляться наиболее полный контакт между данным телом и любыми другими телами с помощью двух присущих ему видов движения — переносов и вращений — с одинаковым числом степеней свободы для обоих видов движения.

Три измерения пространства необходимо связаны также с природой электромагнитного поля, осуществляющего связь между вещественными заряженными частицами. Это становится очевидным, если рассматривать распространение свободной электромагнитной волны, характеризующееся тремя взаимно перпендикулярными векторами — электрической и магнитной напряженностей и направления распространения волны. В общем виде на наличие связи между четырехмерностью пространства-времени, с одной стороны, и структурой электромагнитного поля, с другой, было указано Вейлем в 1919 г.¹⁾

Представляет интерес доказательство²⁾, что в пространстве с четным числом измерений не соблюдается принцип Гюйгенса об отсутствии деформации волны при ее распространении от источника к приемнику. При распространении электромагнитной волны в пространстве с четным числом измерений за фронтом волны (распространяющимся со скоростью c) будет следовать набор волн, движущихся с различными скоростями, от нуля до c . В таком пространстве невозможна неискаженная передача импульсов, осуществляющих взаимодействие между телами.

Наконец, существенность трехмерного характера движения элементарных частиц стала особенно ясной в связи с открытием спиральности элементарных частиц (см. ниже). Спиральность может быть осуществлена только в пространстве с числом измерений, равным трем. Из сказанного следует, что в окружающем нас мире не существует объектов, число измерений которых отличается от трех.

Мир с иным числом измерений не был бы похож на реальный окружающий нас мир не только в отношении геометрическом, но и по другим общим свойствам.

1) H. Weyl, Ann. d. Physik 59, 113, 1919; см. также H. Weyl, Philosophy of mathematics and natural science, Princeton, 1949, p. 136.

2) См. Д. И в а н е н к о и А. С о к о л о в, Классическая теория поля, Гостехиздат, М.—Л., 1949, стр. 111.

Таким образом, исследования первой половины 20 века ставили задачей вскрыть существенный характер трехмерности пространства, необходимую связь между числом измерений пространства и общими свойствами материальных образований в мире, их движений и взаимодействий.

2. В отличие от трехмерности пространства, одномерность и однонаправленность времени представлялась очевидной. В ньютоновой концепции одномерность времени рассматривалась как внутреннее его свойство, не связанное с материальными процессами. В лейбницевой концепции это свойство времени представляется как выражение непрерывной смены состояний всех объектов мира, непрерывности и имманентности движения.]

Время отличается от пространства не только числом измерений, но и необратимостью, т. е. невозможностью своего течения от будущего к прошлому. Эту особенность времени последователи концепции времени как формы существования материи, естественно, стремились объяснить, связывая ее с общими свойствами движения.

Еще Лейбниц указывал на связь необратимости времени с необратимостью причинно-следственных отношений. Причина всегда предшествует следствию, т. е. существует, когда еще следствие не возникло; соответственно прошлое предшествует будущему. Как мы видели, в теории относительности это соотношение между причинно-следственными отношениями и отношениями «прошлое — будущее» принимает количественную форму, ограничивая возможные преобразования времени при переходе от одних систем отсчета к другим.

Но можно поставить вопрос по-другому: возможна ли обратимость отношения «причина — следствие»? Нельзя ли предположить, что вся цепь событий в мире может развернуться в обратном направлении? Если это возможно, то с точки зрения понимания времени как формы бытия материи можно условно сказать, что «время потечет вспять». И хотя прошлое остается прошлым, т. е. существование определенной последовательности состояний остается совершившимся фактом, но это прошлое — при условии всеобщей обратимости материальных процессов — могло бы стать будущим. Таким образом, проблема

обратимости времени в этом смысле сводится к вопросу об обратимости движения ¹⁾).

Известно, что уравнения динамики обратимы во времени. Это значит, что если изменить все направления движений материальных точек механической системы на обратные, то система будет совершать движение «вспять». Обратимы во времени и уравнения электромагнитного поля. Однако реальные термодинамические системы необратимы, поскольку энтропия системы при любых процессах возрастает. Это означает, что в природе не существует механизма, который мог бы в точности осуществить согласование всех элементарных процессов в макроскопической системе таким образом, чтобы реальный процесс в системе стал бы разворачиваться в точности в обратном направлении. Наличие флуктуаций в природе исключает возможность существования такого «согласующего устройства».

Это справедливо еще в большей степени по отношению к системе с переменным числом частиц, в которой частицы могут рождаться и исчезать.

Обратимость процессов в реальных макроскопических системах оказывается еще большей абстракцией, если в системе имеет место гистерезис — зависимость изменений от предшествующей истории системы. Вообще, чем сложнее элементы системы, которые можно рассматривать как относительно целостные образования (например, макромолекулы полимера, клетки организма), тем более применимо понятие «старения» системы, ее развития во времени, тем более она необратима. В силу сказанного представление об обратимости времени — в указанном выше смысле — лишено каких-либо реальных оснований. Таким образом, данные современной науки все более подкрепляют старое представление о необратимости времени в любом смысле этого слова.

3. Большую роль играют такие свойства пространства, как однородность и изотропность, времени — однородность.

¹⁾ Следует еще раз подчеркнуть, что обратимость времени в последнем толковании отнюдь не означает «течения времени вспять» в буквальном смысле, ибо в данном случае речь идет не о перестановке уже совершившихся событий, а о возможности обратной последовательности событий.

Однородность пространства заключается в равноценности всех его точек. Это означает, что перенос начала системы отсчета от одного тела материального базиса к другому не влияет на характеристики и закономерности физических процессов. Однородность времени также состоит в равноценности всех «точек» времени; это означает, что перенос начала отсчета времени также не влияет на характеристики и закономерности движения. Изотропность пространства состоит в равноценности всех направлений. Если пространство изотропно, то поворот системы отсчета на некоторый угол не влияет на закономерности процессов.

Однородность пространства и времени характерна для инерциальных систем отсчета. Выше было показано, что требование однородности пространства и времени является одним из исходных положений специальной теории относительности (см. § 8).

Неевклидовы пространство и время в общем случае неоднородны. Наличие поля тяготения вообще создает неравноценность различных точек пространства и времени. Это проявляется в том, что при движении тела в поле тяготения связанные с ним часы будут изменять свой ход по сравнению с часами, расположенными в инерциальной системе отсчета. То же будет иметь место в ускоренной системе отсчета (см. § 11).

Указанные свойства пространства и времени играют очень важную роль в физике. В 1918 г. Э. Нетер сформулировала теорему, носящую ее имя. Согласно теореме Нетер, имеется глубокая связь между свойствами симметрии пространства и времени и наиболее общими физическими законами сохранения импульса, энергии и момента количества движения. Однородность пространства, т. е. инвариантность законов физики по отношению к преобразованиям систем отсчета, заключающимся в переносе начала системы пространственных координат, однозначно связана с законом сохранения импульса (количества движения) замкнутой материальной системы; однородность времени, или инвариантность физических законов по отношению к преобразованиям систем отсчета, заключающимся в переносе начала отсчета времени, связана с законом сохранения энергии материальной системы; наконец, изотропность пространства, или инвариантность по отношению к преобразо-

ваниям, заключающимся в поворотах системы отсчета, связана с законом сохранения момента количества движения.

Нетрудно убедиться, что при отклонении от этих свойств пространства и времени указанные законы сохранения действительно не имеют места. Например, импульс частицы, движущейся относительно ускоренной системы отсчета, не сохраняется и при отсутствии непосредственного внешнего воздействия на частицу. Энергия фотона, распространяющегося в поле тяготения, также в общем случае не сохраняется. Наличие указанных связей геометрических и динамических величин свидетельствует о правильности понимания пространства и времени как общих форм бытия материи.

§ 19. Преобразования отражения пространства и времени

1. В последние годы большой интерес вызвал вопрос о симметрии «правого» и «левого», связанный с одним из фундаментальных законов квантовой теории, законом сохранения четности.

Проблема отношения правого и левого впервые была подвергнута анализу Кантом. Если мы рассматриваем две плоские (двухмерные) симметричные фигуры, то правая и левая стороны каждой фигуры поменяются местами, если фигуру повернуть вокруг оси так, чтобы она вышла из плоскости; следовательно, поворотом можно привести обе фигуры в совпадение. Если же мы имеем дело с двумя трехмерными структурами, являющимися зеркальными отображениями друг друга, то никакими перемещениями невозможно совместить обе фигуры. Только отобразив одно из тел в зеркале и повернув изображение на 180° , можно получить две в точности одинаковые пространственные фигуры.

Несовместимость правой и левой трехмерной структуры хорошо известна из опыта; их различия можно наглядно себе представить, сопоставляя правый и левый винт или правую и левую систему координат.

Кант пытался использовать различие правого и левого для доказательства несостоятельности лейбницево́й концепции пространства. Если пространство, писал Кант, есть «порядок» расположения тел, то непонятно, почему правая рука, имеющая точно такое же строение, как левая,

существенно отличается от нее в пространственном отношении — обе руки не могут быть совмещены никакими движениями. Кант рассматривал это соображение как решающий довод в пользу ньютонова абсолютного пространства. В действительности этот довод не имеет никакой доказательной силы. Дело сводится к тому, что при выборе двух положительных направлений в пространстве (например, положительных направлений осей x и y декартовой системы координат) возможен двоякий выбор положительной нормали к плоскости xy ; естественно, что оба возможных направления положительной оси z будут противоположны друг другу, и, следовательно, «порядок» в обоих случаях будет разный.

Нетривиальным здесь является факт, что правая и левая системы координат не могут быть совмещены друг с другом путем перемещения в пространстве. Этот факт подтверждает лишь то, что в пространстве механически обнаруживаются три измерения; если бы число измерений пространства было больше трех, то привести в совпадение левую и правую системы координат можно было бы путем перемещения — поворотом вокруг «четвертой оси».

2. До 1956 г. не подозревали о возможности существования «зеркальных антиподов» у элементарных частиц. Было известно лишь о наличии двух типов волновых функций, характеризующих поведение частиц, — симметричной и антисимметричной. Симметричная относительно координат волновая функция не меняет знака при замене знака координаты (при отражении в плоскости, перпендикулярной данной оси координат), антисимметричная — меняет знак. Однако поскольку при взаимодействиях частиц существенны произведения волновых функций, то величина, характеризующая взаимодействие частиц — гамильтониан, — не меняется при зеркальном отражении.

Таким образом, считалось, что физические процессы в микромире не зависят от замены левой системы координат на правую (инвариантны относительно пространственной инверсии). С инвариантностью волновых функций относительно пространственной инверсии связана величина, называемая *четностью*.

Четность состояния микросистемы определяется не только природой частиц (внутренней четностью), но и

характером их движения, а именно орбитальным моментом количества движения l ; орбитальная четность равна $(-1)^l$. Полная пространственная четность системы равна произведению внутренней четности на орбитальную.

Опыт показывает, что при всех ядерных и электромагнитных взаимодействиях элементарных частиц (в так называемых сильных взаимодействиях, быстро протекающих) пространственная четность системы сохраняется; система в конечном состоянии в результате взаимодействий такого рода сохраняет то же значение четности, что и в начальном состоянии. Реакции между элементарными частицами, которые могли бы привести к несохранению четности при сильных взаимодействиях, в опыте не наблюдаются. Таким образом, пространственной симметрии правого и левого соответствует закон сохранения четности.

Однако в 1956 г. было показано сначала теоретически (Ли и Янг), а затем и экспериментально (Ву), что сохранение пространственной четности отнюдь не является универсальным законом, подобно закону сохранения энергии и импульса. Оказалось, что при так называемых слабых взаимодействиях — самопроизвольных распадах частиц (K -мезона, π -мезона, при β -распаде), происходящих в миллионы раз медленнее, чем сильные взаимодействия, пространственная четность системы не сохраняется. Например, K -мезон может распадаться двумя путями — на два π -мезона и на три π -мезона. Поскольку внутренняя четность π -мезона равна -1 , ясно, что четность конечной системы будет в этих случаях распада различной; она будет равна $(-1)^2 = +1$ в одном случае и $(-1)^3 = -1$ в другом. Далее оказалось, что при определенной ориентации спина спонтанно распадающихся частиц, например нейтронов, число электронов, вылетающих по направлению спина ориентированных нейтронов, меньше, чем в противоположном направлении; это значит, что импульс электронов коррелирован со спином нейтронов. Если бы четность системы сохранялась, то такая корреляция была бы невозможной, так как при зеркальном отражении направление спина (аксиального вектора) сохраняется, направление же импульса переходит в противоположное. Выяснилось, наконец, что при переходе от частиц к античастицам, т. е. при изменении знака заряда частиц, корреляция спина

и импульса изменяется; таким образом, выявляется связь между внутренней четностью элементарной частицы и ее зарядом. Ли и Янг, а затем Ландау высказали предположение, что несохранение четности связано с несимметричностью самих элементарных частиц по отношению к «правому» и «левому». Частица как бы образует при движении винт; одни виды частиц представляют собой «правые винты», другие — «левые». Поэтому при пространственной инверсии частицы не сохраняют внутренней четности: правый винт переходит в левый, и наоборот.

Вслед за тем Ландау предложил гипотезу, что внутренняя право-левая асимметрия частиц связана с их зарядом. В силу этого должна сохраняться не пространственная внутренняя четность сама по себе, а «комбинированная четность» — произведение внутренней четности на зарядовую. Таким образом, напрашивается вывод, что право-левая асимметрия свойственна любой элементарной частице, обладающей отличным от нуля зарядом.

Наряду с предположением Ландау было высказано другое допущение (И. С. Шапиро), что несохранение четности обусловлено изменением свойств пространства на очень малых расстояниях (порядка 10^{-16} — 10^{-17} см). Дело в том, что слабые взаимодействия характеризуются константой взаимодействия ($\sim 10^{-49}$ эрг·см³), которой соответствует характерная единица длины $\sim 10^{-17}$ см. Согласно этой гипотезе, пространство на столь малых расстояниях неориентируемо — ему нельзя приписать свойства правого и левого; следовательно, для таких расстояний понятие зеркального отражения и связанной с ней величины — четности — лишается смысла.

Понятие неориентируемости малых пространственных интервалов находится в соответствии с представлением о нелокализированности взаимодействий на таких расстояниях — с представлением о невозможности дальнейшего физического разделения таких пространственных величин. В некоторых исследованиях делаются попытки установить связь между свойствами симметрии пространства и времени и их квантованием. Дальнейшее развитие физики элементарных частиц покажет, насколько эта гипотеза обоснована.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ ряда экспериментальных фактов и закономерностей, установленных естествознанием — прежде всего физикой — к середине нашего столетия, позволяет дать определенный ответ на вопросы о сущности и общих свойствах пространства и времени, поставленные задолго до нашей эпохи философией. Естествознание полностью обосновывает и подтверждает определение пространства и времени соответственно как общих форм сосуществования и смены состояний материальных объектов. Пространство — это общая форма сосуществования материальных объектов, заключающаяся в том, что они в процессе взаимодействия закономерно расположены друг относительно друга и находятся в определенных количественных (метрических, топологических) отношениях друг к другу. Время — это общая форма смены состояний изменяющихся материальных объектов, заключающаяся в том, что каждое состояние представляет собой определенное звено процесса (или процессов), совершающегося в системе, и находится в определенных количественных отношениях к другим состояниям, составляя ту или иную часть процесса.

Таким образом, пространство и время — это совокупность внешних отношений материальных объектов и их состояний (явлений). Пространственно-временные отношения подчиняются закономерностям, являющимся весьма общими физическими закономерностями.

Такое понимание сущности пространства и времени соответствует представлению о мире как единой совокупности изменяющихся материальных объектов, находящихся во взаимной связи и представляющих собой различные формы материи. Единый изменяющийся материальный

мир дифференцирован, расчленен на относительно устойчивые, расположенные вне друг друга материальные образования; процессы, совершающиеся в них и обуславливающие их сохранение (воспроизведение) и вместе с тем изменение, также относительно дифференцированы, представляя собой последовательность сменяющих друг друга явлений, или состояний. В этой картине мира, следовательно, каждый материальный объект представляется лишь как относительно выделенная часть более общей материальной системы, каждое явление — как относительно выделенное звено более общего процесса.

В книге показано, что свойства пространства-времени различны на разных «уровнях» материи, что они относительно. Абсолютно лишь само существование пространства и времени как всеобщих форм бытия, как наиболее общих внешних отношений материальных объектов и их состояний.

2. Изложенное определение пространства и времени исключает общепринятое в прошлом веке понимание их как независимых от материи абсолютных особых «начал», как вместилищ вещей и событий, обладающих изначально, присущими им *ad hoc* свойствами.

Идея абсолютного пространства и времени, как было показано в первой главе, соответствует определенной физической картине мира, а именно системе взглядов на материю, которая существовала в естествознании до середины 19 века. Концепция абсолютного (универсального) пространства и времени исторически и логически вытекала из взгляда на материю как на совокупность абсолютно отграниченных друг от друга индивидуальных элементов.

Материя мыслилась как состоящая в конечном счете из простейших частиц, обладающих неизменными объемом и инертностью (массой) и действующих друг на друга мгновенно либо на расстоянии, либо при соприкосновениях (столкновениях). Такие материальные объекты могут существовать только в абсолютном пространстве и абсолютном времени. Мировое пространство с этой точки зрения есть либо пустота, либо же оно совпадает с изначальной протяженностью среды. Абсолютное время представляли себе как неизменный «поток», не связанный с материальными процессами,

Живучесть этой концепции пространства и времени на протяжении двух веков была обусловлена не только тем, что она была органической частью физической картины мира, но и тем, что она находилась в соответствии с евклидовой геометрией и классической механикой.

Открытие электромагнитного поля и выяснение несводимости поля к состояниям механической среды — мирового эфира — вскрыли несостоятельность этой картины мира. Оказалось, что материя не может быть представлена как совокупность отдельных, строго отграниченных друг от друга индивидуумов, связанных мистическими силами дальнего действия или же соприкосновением.

В действительности частицы вещества связаны друг с другом в единые системы полем, действия которого передаются с конечной скоростью, одинаковой в любой замкнутой системе. Уяснение этого фундаментального факта привело к крушению идеи абсолютного пространства и времени, поскольку из него вытекало следствие об относительности расстояний и промежутков времени.

В самом деле, абсолютному пространству присущи собственные размеры, расстояния от одних точек до других; основное свойство абсолютного времени — это продолжительность его промежутков, разделяющих разные мгновения. Установление факта относительности расстояний и промежутков времени, разделяющих события, отрицает у пространства и времени те свойства, которые им приписывались как вместилищам вещей и событий, — собственные размеры, ни от чего не зависящие. Но в таком случае нельзя говорить о пространстве и времени *самих по себе*. Остается только другой ответ на вопрос о сущности пространства и времени: пространство и время — это совокупность отношений, характеризующих сосуществование вещей и последовательность событий. Пространственно-временные величины относятся всегда только к материальным объектам и процессам. Сами по себе, независимо от материальных объектов, эти отношения не существуют. И это обстоятельство находит свое выражение в данном выше определении пространства и времени как отношений сосуществования и смены явлений.

3. Отметим основные особенности метрических свойств пространства и времени.

Во-первых, не имеет смысла говорить о положении отдельно взятого тела или о моменте свершения отдельного события безотносительно к другим. Соответственно не имеет смысла и понятие «движение отдельного тела самого по себе». Основными понятиями являются расстояние и промежуток времени между событиями, определенные по отношению к той или иной материальной системе — базису системы отсчета. Роль системы отсчета в современной концепции пространства и времени существенно иная, чем в старой. В концепции абсолютного пространства и времени система отсчета служит лишь для измерения расстояний между точками и промежутков времени между мгновениями. В современной концепции пространства и времени расстояния и промежутки времени между событиями лишены полной определенности, если их не относить к системе квазитвердых тел и стационарных процессов.

Вторая особенность современной концепции пространства и времени состоит в том, что координация событий рассматривается как *физический процесс*, осуществляемый посредством передачи действий поля, а именно с помощью электромагнитных сигналов. Вследствие этого координация событий различна по отношению к разным замкнутым (инерциальным) системам. По этой же причине изменение координации событий при переходе от одной инерциальной системы к другой совершается по определенным законам (преобразования Лоренца). Различие координации событий по отношению к разным системам отсчета проявляется в относительности одновременности разноместных событий, в различии размеров тел и темпов процесса по отношению к разным инерциальным системам, движущимся друг относительно друга, наконец, в различии в разных системах отсчета таких параметров материальных объектов и характеристик их взаимодействий, как масса тела и напряженность поля.

Наконец, в-третьих, между расстояниями и промежутками времени, разделяющими пару событий в разных системах отсчета, существует определенное количественное отношение, а именно величина интервала между ними. В зависимости от того, могут ли события быть связаны причинной зависимостью или нет, интервал является времениподобным или пространственноподобным; это значит,

что в собственной системе отсчета, связанной с центром масс взаимодействующих объектов — «носителей» этих событий, — интервал сводится либо только к промежутку времени (оба события происходят в одном и том же объекте), либо только к расстоянию (оба события совершаются одновременно в разных объектах).

4. В литературе обычно подчеркивается, что пространство и время есть «условие бытия» вещей и явлений. Об этом писал Энгельс в полемике с Дюрингом. Каждое явление, любое движение совершается в пространстве и времени, которые существуют до этого явления, предшествуют ему, являются для него условием. И это утверждение безусловно верно. Оно нисколько не противоречит пониманию пространства и времени как форм сосуществования и последовательности явлений, как внешних отношений материальных объектов и процессов. Общие закономерные отношения сосуществования и последовательности не обусловлены отдельными вещами или явлениями. В конечном счете пространственно-временные отношения обусловлены общими законами взаимодействия материальных объектов. Таково современное диалектико-материалистическое понимание пространства и времени.

Позитивисты (например, Мах) также рассматривали пространство и время как упорядоченность явлений. Но позитивисты, в отличие от материалистов (и даже от объективных идеалистов), только констатируют наличие «упорядоченности», они отрывают пространственно-временные отношения от материи. Поэтому закономерности пространства и времени у них выступают как чисто опытные «констатации», не находящиеся ни в какой связи с общим характером взаимодействия материальных объектов, с общими законами распределения и движения материи. По этой причине Мах оказался в числе противников теории относительности.

В книге было показано, что закономерности пространства и времени можно правильно истолковать, только учитывая связь этих форм бытия материи с другими общими физическими закономерностями, в частности связь пространства и времени с полем. «Непривычность» теории относительности, «странность» таких ее положений, как относительность одновременности, исчезает не вследствие

того, что к этим положениям постепенно привыкают, а только при правильном понимании смысла теории относительности.

Во второй главе было показано, что уже в исходных положениях теории относительности — в ее постулатах — по существу содержится связь между современной концепцией пространства и времени и представлениями о поле. Нет необходимости снова разбирать другие неправильные взгляды, уже рассмотренные в соответствующих местах книги. Они являются следствием отрыва представлений о пространстве и времени от современной физической картины мира в целом.

Анализ различных направлений в трактовке проблем пространства и времени полностью подтверждает правильность взглядов диалектического материализма.

5. Общая теория относительности внесла дальнейший вклад в разработку научной материалистической концепции пространства и времени. Выяснилось, что пространство-время изменяет свою структуру (метрику) при изменении концентрации масс и обусловленного массами поля тяготения. Вблизи массивного тела на различных расстояниях от него различны потенциалы поля тяготения; соответственно изменяются и пространственно-временные метрические соотношения. Только в достаточно малой области, где изменением поля тяготения можно пренебречь, материальную систему можно считать инерциальной. В местах с различными значениями потенциалов поля тяготения одно и то же тело имеет несколько отличающиеся размеры, различны также темпы процессов; инерциальное движение частицы в поле тяготения происходит не по прямой, а по геодезической кривой. Изменение частоты периодических процессов даже при очень малых изменениях поля тяготения подтверждено в недавних опытах по резонансному рассеянию гамма-излучения (эффект Мёсбауэра). Наконец, представление о возможности постепенного изменения метрики пространства-времени в части вселенной; о меняющемся неевклидовом пространственно-временном фоне, явилось дальнейшим развитием положения о зависимости метрических свойств пространства и времени от материальных условий, существующих в данной части мира.

Из сказанного следует важный вывод. Поскольку свойства пространства и времени обусловлены распределением и движением материальных объектов, можно изменять темпы всех процессов. Ход времени в ограниченной материальной системе может быть замедлен или ускорен в зависимости от распределения окружающих систему масс или от характера движения системы.

6. Теория относительности исследует метрические свойства пространства и времени — количественные отношения между расстояниями и промежутками времени, разделяющими события. Однако свойства пространства-времени не сводятся к метрике. Важное значение имеет также, во-первых, вопрос о природе элементарного «события», другими словами, проблема прерывности и непрерывности пространства и времени, и, во-вторых, проблема симметрии пространства и времени. Решение этих проблем оказалось связанным с квантовой механикой и квантовой теорией поля.

В старой концепции абсолютного пространства и времени они рассматривались как чисто непрерывные, как реально состоящие из лишенных размера точек и мгновений. Прерывность (точнее, наличие границ) приписывалась вещам и процессам. Теория относительности сохранила представление о бесконечной делимости пространства и времени, о точности элементарного события, поскольку она основана на макроскопической теории поля, учитывающей только непрерывность поля (хотя, в отличие от старой концепции, она не утверждает, что пространство и время реально разделены на точки). В квантовой теории проблема дискретности и непрерывности ставится по-другому.

В квантовой механике устанавливается связь между пространственно-временными и импульсно-энергетическими проявлениями микрочастицы. Локализация микрочастицы в пространстве и времени тем определеннее, чем менее определенными являются импульс и энергия частицы; наоборот, чем определеннее «энергетическая индивидуальность» данной частицы, тем менее определенным является пространственное и временное выделение ее из системы, к которой она относится. Это можно понимать так, что точечная локализация микрочастицы, или выделение ее действия в «точечное мгновение», требует бесконечно

большой энергии, что неосуществимо. Квантовая теория поля еще сильнее выявляет эту особенность микрочастиц, поскольку при достаточно большой энергии взаимодействия элементарная частица вообще может не сохранить свою индивидуальность, а превратиться в другие частицы. Поэтому имеются основания рассматривать представление об абсолютной точечности события как физически необоснованное и ведущее к противоречиям. Однако вопрос о наличии предела делимости пространства и времени и об их квантовании остается нерешенным. Решение проблемы атомизма пространства и времени связано с решением основных проблем теории элементарных частиц. По-видимому, большое значение имеет дальнейшая разработка понятия «статистического пространства».

Свойства симметрии пространства и времени также связаны с наиболее общими свойствами материи, движения и взаимодействия. Это было показано, в частности, при рассмотрении вопросов о трехмерности пространства и необратимости времени.

Общность того или иного свойства симметрии пространства и времени соответствует степени общности, универсальности, «сопряженного» ему свойства движения. Необратимость времени имеет самый общий характер потому, что принцип развития материальных объектов, которому это свойство времени соответствует, универсален и не знает исключений.

7. Многие проблемы, относящиеся к метрическим свойствам пространства и времени, остаются еще нерешенными. К ним принадлежат проблемы, связанные с так называемыми универсальными постоянными.

Прежде всего, возникает вопрос, чем обусловлено постоянство скорости света в вакууме. Речь идет о локальной скорости света в инерциальной системе, равной $\sim 300\,000$ км/сек. Встречающееся в литературе утверждение, что постоянство скорости света является выражением универсальной связи пространства и времени, не может рассматриваться как ответ на поставленный выше вопрос. Возможно, решение этой проблемы следует искать в каких-то фундаментальных свойствах движения, в микроскопическом «механизме» движения частицы и связи этого процесса с полем.

Неясна также связь между константой тяготения и другими универсальными постоянными — зарядами других полей, прежде всего элементарным электрическим зарядом. Если будет установлена зависимость постоянной тяготения от других величин, то, очевидно, связь между метрикой пространства-времени и полем тяготения окажется более сложной, чем это представляется в настоящее время. К этой проблеме относится также и вопрос о существовании так называемой космической (космологической) постоянной, введенной Эйнштейном, т. е. вопрос о существовании негравитационного поля сил, связывающего космические тела.

Нерешенным остается и вопрос о метрике пространственно-временного «фона», зависящей от материальной структуры Метагалактики.

Все эти проблемы, равно как и вопрос о свойствах пространства-времени в очень малых областях, имеют важное значение не только для физики и космологии, но и для философии.

871011