

## Физика и реальность

Эйнштейн Альберт

### ПРИНЦИПЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ.

Разрешите, прежде всего, принести вам свою глубокую благодарность за оказанную услугу, наиболее ценную из тех, которую можно оказать такому человеку, как я. Избранием в вашу Академию вы меня освободили от волнений и забот службы и позволили полностью посвятить себя занятиям наукой. Заверяю вас в своем чувстве благодарности и настойчивости моих усилий, даже если плоды моих трудов покажутся вам неприметными.

Позвольте мне в связи с этим сделать несколько общих замечаний о месте, которое занимает область моей деятельности, теоретическая физика, по отношению к физике экспериментально. Один знакомый математик полусушуя сказал мне недавно: “Математик уже кое-что может, но, разумеется, как раз не то, что от него хотят получить в данный момент”. Аналогично ведет себя часто физик-теоретик, приглашенный дать совет физику-экспериментатору. В чем причина этой характерной неадаптивности?

Для применения своего метода теоретик в качестве фундамента нуждается в некоторых общих предположениях, так называемых принципах, исходя из которых он может вывести следствия. Его деятельность, таким образом, разбивается на два этапа. Во-первых, ему необходимо отыскать эти принципы, во-вторых — развивать вытекающие из этих принципов следствия. Для выполнения второй задачи он основательно вооружен еще со школы. Следовательно, если для некоторой области, т. е. совокупности взаимозависимостей, первая задача решена, то следствия не заставят себя ждать. Совершенно иного рода первая из названных задач, т. е. установление принципов, могущих служить основой для дедукции. Здесь не существует метода, который можно было бы выучить и систематически применять для достижения цели. Исследователь должен, скорее, выведать у природы четко формулируемые общие принципы, отражающие определенные общие черты совокупности множества экспериментально установленных фактов.

Если такая формулировка удалась, начинается развитие следствий, которые часто дают непредвиденные соотношения, ведущие далеко за пределы области фактов, из которых были получены принципы. Но до тех пор, пока принципы, могущие служить основой для дедукции, не найдены, отдельные опытные факты теоретику бесполезны; ибо он не в состоянии ничего предпринять с единичными эмпирически установленными общими закономерностями. Наоборот, он застывает в беспомощном состоянии перед единичными результатами эмпирического исследования до тех пор, пока не раскроются принципы, которые он сможет сделать основой для дедуктивных построений.

В подобном положении находится в настоящее время теория, касающаяся законов теплового излучения и молекулярного движения при низких температурах. Лет 15 тому назад не сомневались в том, что, исходя из приложенной к молекулярному движению механики Галилея — Ньютона

и теории электромагнитного поля Максвелла, можно правильно описать электрические, оптические и тепловые свойства тел. И вот Планк показал, что для установления соответствующего опытам закона теплового излучения нужно воспользоваться методом расчета, несовместимый с принципами классической механики становилась все более ясной. Этим методом расчета Планк ввел в физику так называемую квантовую гипотезу, которая за прошедшее с тех пор время была блестяще подтверждена. Этой гипотезой он отверг классическую механику для случаев, когда достаточно малые массы движутся с достаточно малыми скоростями и достаточно большими ускорениями, так что сегодня мы можем рассматривать установленные Галилеем и Ньютоном законы только как предельные. Но несмотря на усилия теоретиков, до сих пор не удалось заменить принципы механики другими, которые бы соответствовали планковскому закону теплового излучения и гипотезе квантов. Хотя установлено несомненно, что теплота сводится к движению молекул, мы должны признать, что находимся по отношению к основным законам этого движения в том же положении, в котором до Ньютона астрономы находились по отношению к законам движения планет.

Я только что указал на совокупность фактов, для теоретического рассмотрения которых отсутствуют принципы. Но можно указать также случаи, когда четко сформулированные принципы ведут к следствиям, которые полностью или почти полностью выходят за рамки явлений, доступных в настоящее время исследованию. Чтобы узнать, соответствуют ли в этом случае принципы теории истине, понадобится, может быть, многолетняя экспериментальная исследовательская работа. Такой случай представляет нам теория относительности.

Анализ основных представлений о пространстве и времени показал, что установленный в оптике движущихся тел закон постоянства скорости света в вакууме отнюдь не принуждает принять теорию некоторого неподвижного эфира. Напротив того, нужно построить общую теорию, учитывающую то обстоятельство, что проведенные на Земле опыты ничего не могут сказать о поступательном движении Земли. При этом используется принцип относительности, который гласит: вид законов природы не меняется, если от начальной (принятой за таковую) системы координат перейти к другой, обладающей относительно первой равномерным поступательным движением. Эта теория получила достойные упоминания экспериментальные подтверждения и привела к упрощению теоретического изложения совокупности фактов, уже приведенных в соответствие друг с другом.

Вместе с тем, с теоретической точки зрения, эта теория не дает полного удовлетворения, потому что сформулированный выше принцип относительности отдаст предпочтение равномерному движению. Если верно, что с физической точки зрения равномерному движению нельзя приписывать абсолютного смысла, то возникает вопрос — нельзя ли распространить это утверждение и на неравномерные движения? Оказывается, что если положить в основу таким образом обобщенный принцип относительности, то можно достигнуть вполне определенного развития теории относительности. Это приводит к общей теории тяготения, включающей ди-

намику. Но пока отсутствует фактический материал, на котором можно было бы проверить обоснованность введения положенного в основу принципа.

Мы установили, что индуктивная физика ставит дедуктивной, а дедуктивная физика — индуктивной вопросы, решение которых требует напряжения всех сил. Пусть объединенными усилиями удастся вскоре добиться решающих успехов!

## ПРИНЦИПЫ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Храм науки — строение многосложное. Различны пребывающие в нем люди и приведшие их туда духовные силы. Некоторые занимаются наукой с гордым чувством своего интеллектуального превосходства; для них наука является тем подходящим спортом, который должен им дать полноту жизни и удовлетворение честолюбия. Можно найти в храме и других: они приносят сюда в жертву продукты своего мозга только в утилитарных целях. Если бы посланный богом ангел пришел и изгнал из храма всех людей, принадлежащих к этим двум категориям, то храм бы катастрофически опустел, но в нем все-таки остались бы еще люди как прошлого, так и нашего времени. К ним принадлежит и наш Планк, и поэтому мы его любим.

Я хорошо знаю, что мы только что с легким сердцем изгнали многих людей, построивших большую, возможно даже наибольшую, часть науки; по отношению ко многим принятое решение было бы для нашего ангела горьким. Но одно кажется мне несомненным: если бы существовали только люди, подобные изгнанным, храм не поднялся бы, как не мог бы вырасти лес из одних лишь выющихся растений. Этим людям удовлетворяет, собственно говоря, любая арена человеческой деятельности; станут ли они инженерами, офицерами, коммерсантами или учеными, это зависит от внешних обстоятельств. Но обратим вновь свой взгляд на тех, кто удостоился милости ангела. Большинство из них люди странные, замкнутые, уединенные; несмотря на эти общие черты они в действительности сильнее разнятся друг от друга, чем изгнанные. Что привело их в храм? Нелегко на это ответить, и ответ, безусловно, не будет одинаковым для всех. Как и Шопенгауэр, я, прежде всего, думаю, что одно из наиболее сильных побуждений, ведущих к искусству и науке, — это желание уйти от будничной жизни с ее мучительной жестокостью и безутешной пустотой, уйти от уз вечно меняющихся собственных прихотей. Эта причина толкает людей с тонкими душевными струнами от личного бытия вовне в мир объективного видения и понимания. Эту причину можно сравнить с тоской, неотразимо влекущей горожанина из окружающей его шумной и мутной среды к тихим высокогорным ландшафтам, где взгляд далеко проникает сквозь неподвижный чистый воздух, тешась спокойными очертаниями, которые кажутся предназначенными для вечности.

Но к этой негативной причине добавляется позитивная. Человек стремится каким-то адекватным способом создать в себе простую и ясную картину мира; и это не только для того, чтобы преодолеть мир, в котором он живет, но и для того, чтобы в известной мере попытаться заменить этот мир созданной им картиной. Этим занимаются художник, поэт, теоретизирующий философ и естествоиспытатель, каждый по-своему. На эту картину и ее оформление человек переносит центр тяжести своей духовной

жизни, чтобы в ней обрести покой и уверенность, которые он не может найти в слишком тесном головокружительном круговороте собственной жизни.

Какое место занимает картина мира физиков-теоретиков среди всех возможных таких картин? Благодаря использованию языка математики эта картина удовлетворяет наиболее высоким требованиям в отношении строгости и точности выражения взаимозависимостей. Но зато физик вынужден сильнее ограничивать свой предмет, довольствуясь изображением наиболее простых, доступных нашему опыту явлений, тогда как все сложные явления не могут быть воссозданы человеческим умом с той точностью и последовательностью, которые необходимы физику-теоретику. Высшая аккуратность, ясность и уверенность — за счет полноты. Но какую прелесть может иметь охват такого небольшого среза природы, если наиболее тонкое и сложное малодушно и боязливо оставляется в стороне? Заслуживает ли результат такого скромного занятия гордое название “картины мира”?

Я думаю, — да, ибо общие положения, лежащие в основе мысленных построений теоретической физики, претендуют быть действительными для всех происходящих в природе событий. Путем чисто логической дедукции из них можно было бы вывести картину, т. е. теорию всех явлений природы, включая жизнь, если этот процесс дедукции не выходил бы далеко за пределы творческой возможности человеческого мышления. Следовательно, отказ от полноты физической картины мира не является принципиальным.

Отсюда вытекает, что высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых путем чистой дедукции можно получить картину мира. К этим законам ведет не логический путь, а только основанная на проникновении в суть опыта интуиция. При такой неопределенности методики можно думать, что существует произвольное число равноценных систем теоретической физики; это мнение в принципе определено верно. Но история показала, что из всех мыслимых построений в данный момент только одно оказывается преобладающим. Никто из тех, кто действительно углублялся в предмет, не станет отрицать, что теоретическая система практически однозначно определяется миром наблюдений, хотя никакой логический путь не ведет от наблюдений к основным принципам теории. В этом суть того, что Лейбниц удачно назвал “предустановленной гармонией”. Именно в недостаточном учете этого обстоятельства серьезно упрекают физики некоторых из тех, кто занимается теорией познания. Мне кажется, что в этом корень и прошедшей несколько лет назад полемики между Махом и Планком.

Горячее желание увидеть эту предустановленную гармонию является источником настойчивости и неистощимого терпения, с которыми, как мы видим, отдался Планк общим проблемам науки, не позволяя себе отклоняться ради благодарных и легче достижимых целей. Я часто слышал, что коллеги приписывали такое поведение необычайной силе воли и дисциплине; но мне представляется, что они не правы. Душевное состояние, способствующее такому труду, подобно религии или влюбленности: ежедневное старание простирается не из

какого-то намерения или программы, а из непосредственной потребности.

Он сидит здесь, наш дорогой Планк, и внутренне посмеивается над этим моим ребяческим манипулированием фонарем Диогена. Наша симпатия к нему не нуждается в банальном обосновании. Пусть любовь к науке украсит и дальше ему жизнь и приведет его к разрешению им самим поставленной и значительно продвинутой важнейшей физической проблемы нашего времени. Пусть ему удастся объединить квантовую механику, электродинамику и механику в логически единую систему.

## § 2. Механика и попытки основать на ней всю физику

Важным свойством нашего чувственного опыта и вообще всего нашего опыта является его последовательность во времени. Этого рода последовательность приводит к мысленному представлению о субъективном времени, как некоторой схеме для упорядочения нашего опыта. Как увидим позже, субъективное время приводит затем, через понятия телесного объекта и пространства, к понятию объективного времени.

Все-таки понятию объективного времени предшествует понятие пространства, а последнему — понятие телесного объекта. Последнее непосредственно связано с комплексами чувственных восприятий. Уже показано, что характерное свойство понятия “телесного объекта” состоит в том, что ему можно приписать существование, независимое от времени (субъективного) и от его воспринимаемости нашими чувствами. Мы это делаем, хотя и наблюдаем его изменение во времени. Пуанкаре правильно настаивал на том, что мы различаем двоякого рода изменения телесного объекта: “изменения состояния” и “изменения положения”. Последние, говорил он, могут регулироваться произвольным движением нашего тела.

Существование предметов, которым в определенной сфере ощущений нельзя приписывать никаких изменений состояния, а только изменения положения, является фактом фундаментального значения для формирования понятия пространства (в определенной степени даже для обоснования понятия телесного объекта). Мы будем называть такой предмет “практически твердым”.

Если в качестве объекта ощущения рассматриваются одновременно, т.е. просто как целое, два практически твердых тела, то для этого ансамбля существуют изменения, которые нельзя считать изменениями положения ансамбля, хотя для каждого из составляющих они являются таковыми. Это ведет к понятию “изменения относительного положения” двух предметов, а также к понятию их “относительного положения”. Мы находим, впрочем, что среди относительных положений имеется одно особого рода, которое мы называем “контактом”[1].

Постоянный контакт двух тел в трех или более “точках” означает, что они соединены в сложное квазитвердое тело. Можно говорить, что второе тело образует тогда продолжение (квазитвердое) первого и, в свою очередь, может быть продолжено квазитвердо. Возможность квазитвердого продолжения тела не ограничена. Истинной сущностью мысленного квазитвердого продолжения тела  $V_0$  является определяемое им бесконечное “пространство”.

Тот факт, что каждый, любым образом расположенный телесный объект может быть приведен в контакт с квазитвердым продолжением определенным образом выбранного тела  $V_0$  (тела отсчета), является, по-моему, эмпирической основой нашего понятия о пространстве. В донаучном мышлении роль  $V_0$  и его продолжения играла твердая кора Земли. Само название геометрии указывает, что понятие пространства психологически связано с Землей как неподвижным телом.

Смелое понятие “пространства”, предшествующее всей научной геометрии, превращает наше мысленное понятие соотношения положений предметов в понятие о положении этих телесных предметов в “пространстве”. Это представляет собой большое формальное упрощение. С помощью понятия пространства достигается, между прочим, такая ситуация, когда каждое описание положения рассматривается как описание контакта; утверждение: точка телесного предмета расположена в некоторой точке пространства  $P$  означает, что предмет касается точки  $P$  тела отсчета типа  $V_0$  (предполагаемого приблизительно продолженным) в рассматриваемой точке.

В греческой геометрии пространство играло только качественную роль, потому что хотя положение тела в пространстве безусловно считалось заданным, но оно не описывалось числами. Декарт первым ввел этот метод. На его языке все содержание евклидовой геометрии могло быть аксиоматически основано на следующих утверждениях:

- 1) две фиксированные точки твердого тела определяют некоторое расстояние;
- 2) точкам пространства можно сопоставить тройку чисел  $x_1, x_2, x_3$  таким образом, что для каждого расстояния  $P' - P''$  крайние точки которого имеют координаты  $x_1', x_2', x_3'$  и  $x_1'', x_2'', x_3''$ , выражение

$$s_2 = (x_1'' - x_1')^2 + (x_2'' - x_2')^2 + (x_3'' - x_3')^2$$

не зависит от положения данного тела и положения всех остальных тел.

Это число  $s$  (положительное) означает длину отрезка, или расстояние между точками пространства  $P'$  и  $P''$  (которые совпадают с точками  $P'$  и  $P''$  прямой).

Формулировка намеренно так выбрана, что она ясно выражает не только логическое и аксиоматическое, но и эмпирическое содержание евклидовой геометрии. Правда, чисто логическое (аксиоматическое) представление последней обладает большей простотой и ясностью. Но зато оно вынуждено отказаться от представления связи между идеальным построением и чувственным восприятием, а ведь значение геометрии для физики базируется только на этой связи. Фатальная ошибка, что в основе евклидовой геометрии и связанного с ней понятия пространства лежали потребности мышления, обусловлена тем, что эмпирическая основа, на которую опирается аксиоматическое построение евклидовой геометрии, была предана забвению.

В той мере, в которой можно говорить о существовании в природе твердых тел, евклидова геометрия должна

считаться физической наукой, польза которой должна быть показана ее применением к чувственному восприятию. Она касается совокупности законов, которые должны быть действительны для относительных положений твердых тел независимо от времени. Мы видим, что физическое понятие пространства в том виде, в котором оно применялось первоначально в физике, также связано с существованием твердых тел.

С точки зрения физика, существенное значение евклидовой геометрии состоит в том, что ее законы не зависят от специфической природы тел, относительные положения которых она изучает. Ее формальная простота характеризуется свойствами однородности и изотропности (и существованием подобных сущностей).

Понятие пространства, правда, полезно, но не необходимо для собственно геометрии, т.е. для формулировки правил, касающихся относительных положений твердых тел. В противоположность этому понятие объективного времени, без которого невозможно формулировать основные принципы классической механики, связано с понятием пространственного континуума.

Введение объективного времени содержит в себе два независимых друг от друга утверждения:

1. Введение местного объективного времени, связывающего последовательность опытов во времени с указаниями “часов”, т.е. с замкнутой системой периодических событий.
2. Введение понятия объективного времени для событий во всем пространстве; только благодаря этому понятию идея местного времени расширяется, становясь идеей о времени в физике.

*Замечание, относящееся к 1-му.* То обстоятельство, что понятие периодического процесса предшествует понятию времени, когда занимаются выяснением происхождения и эмпирического содержания понятия времени, не является, на мой взгляд, “логической ошибкой”. Такая концепция соответствует в точности приоритету понятия твердого (или квазитвердого) тела при трактовке понятия пространства.

Дополнительное *разъяснение ко 2-му.* Господствовавшая до появления теории относительности иллюзия, что с точки зрения опыта смысл одновременности пространственно разделенных событий, а следовательно смысл времени в физике, ясен а идея, происходила от того, что в нашем повседневном опыте мы могли пренебрегать временем распространения света. Для такого рассуждения мы привыкли пренебрегать различием между “одновременно увиденным” и “одновременно наступившим”, в результате чего стирается разница между временем и местным временем.

Неточность, приписываемая эмпирической точкой зрения понятию времени в классической механике, маскируется аксиоматическим представлением пространства и времени как сущностей, независимых от наших чувств. Такое использование понятий, когда они рассматриваются независимо от эмпирической основы, которой они обязаны своим существованием, не всегда является вредной в науке. Но если думать, что эти понятия, происхождение которых

забыто, являются необходимыми и неизбежными спутниками нашего мышления, то это будет ошибкой, которая может стать серьезной опасностью для прогресса науки.

Было счастливой случайностью для развития механики, а следовательно, и для развития физики вообще, что философы прошлого при эмпирической интерпретации понятия объективного времени не вскрыли отсутствия в нем точности. Полные уверенности в реальной значимости построения пространства — времени, они установили фундамент механики, который мы схематически охарактеризуем так:

- (a). Понятие материальной точки: телесный объект, который в отношении своего положения и движения может быть с достаточной точностью описан точкой с координатами  $x_1, x_2, x_3$ . Описание его движения (относительно “пространства”  $V_0$ ) рассмотрением  $x_1, x_2, x_3$  как функций времени.
- (b). Закон инерции: исчезновение компонент ускорения для материальной точки, достаточно удаленной от всех остальных точек.
- (c). Закон движения (для материальной точки): сила = масса  $\times$  ускорение.
- (d). Закон силы (действие и противодействие между материальными точками).

Здесь (b) является не чем иным, как важным частным случаем (c). Истинная теория существует только тогда, когда заданы законы силы. Для того чтобы система точек, взаимосвязанных постоянным образом, могла вести себя как материальная точка, силы должны подчиняться, в первую очередь, закону равенства действия и противодействия.

Эти фундаментальные законы вместе с законом Ньютона для силы тяготения образуют основу механики небесных тел. В этой механике Ньютона, в противоположность указанным выше понятиям о пространстве, происходящим от твердых тел, пространство  $V_0$  входит под формой, которая содержит новую идею: требования (b) и (c) действительны (при заданном законе силы) не для всего пространства  $V_0$ , а только для некоторого  $V_0$  с близкими условиями движения (инерциальной системы). Вследствие этого координированное пространство приобрело одно независимое физическое свойство, которое не содержалось в понятии чисто геометрического пространства,— обстоятельство, которое представило уму Ньютона обширную тему для размышлений (опыт с ведром)[2].

Классическая механика является лишь общей схемой; она становится теорией только после явного указания закона силы (d), что с таким успехом было сделано Ньютоном для небесной механики. Но чтобы достигнуть наибольшей логической простоты фундамента, этот теоретический метод не удовлетворителен в том смысле, что законы силы не могут быть получены логическими и точными соображениями, потому что априори их выбор в значительной степени произволен. Даже закон силы тяготения Ньютона отличается от других

мыслимых законов силы только своей результативностью.

Хотя мы сегодня определенно знаем, что классическая механика не достаточна, чтобы служить фундаментом для всей физики, она всегда находится в центре всего мышления в физике. Причина состоит в том, что несмотря на значительный прогресс, достигнутый со времен Ньютона, мы еще не пришли к новому фундаменту физики, который позволил бы нам быть уверенными, что вся совокупность исследованных явлений и частично увенчанных успехом теоретических систем, сможет быть из него логически выведена. Ниже попытаюсь описать, в чем состоит проблема.

Во-первых, мы должны отдавать себе отчет, до какого предела система классической механики проявила себя способной служить основой для всего ансамбля физики. Так как здесь мы занимаемся только основами физики и ее развитием, мы оставляем в стороне чисто формальный прогресс механики (уравнение Лагранжа, канонические уравнения и т.д.). Одно замечание кажется нам необходимым. Понятие “материальная точка” является фундаментальным для механики. Если теперь мы желаем получить механику телесного предмета, который не может трактоваться как материальная точка, — а, строго говоря, все “воспринимаемые нашими чувствами” предметы принадлежат к этой категории, — то ставится следующий вопрос: как мы должны представить себе предмет, состоящий из материальных точек, и какие силы нужно предполагать действующими между ними? Если механика претендует на полное описание предмета, то этот вопрос необходимо ставить.

Стремление механики считать эти материальные точки и законы сил, действующих между ними, неизменными естественно, ибо изменения во времени находятся вне области механического объяснения. Отсюда видно, что классическая механика должна вести к атомистической структуре материи. И теперь мы устанавливаем с очевидностью как ошибаются теоретики, думающие, что теория индуктивно выводится из опыта. Даже великий Ньютон не смог избежать этой ошибки (*Hypotheses non fingo* — “Типотез не измышляю”). Чтобы не теряться без использования такого способа мышления (атомистического), наука вначале поступила следующим образом. Механика системы определена, если потенциальная энергия системы задана как функция ее конфигурации. Теперь, если действующие силы таковы, что они обеспечивают сохранение определенных свойств порядка в конфигурации системы, то конфигурация с достаточной точностью может быть описана сравнительно небольшим числом переменных  $dq$ ; потенциальная энергия принимается в расчет только в той мере, в какой она зависит от этих переменных (например, описание конфигурации практически твердого тела шестью переменными).

Вторым способом приложения механики, при котором избегается учет деления материи на “реальные” материальные точки, является механика так называемых сплошных сред. Эта механика характеризуется фиктивным допущением, что плотность и скорость материи непрерывным образом зависят от координат и времени и что не заданная явно часть взаимодействия может рассматриваться как сила, действующая на поверхность (сила давления), которая, с другой стороны, является непрерывной функцией положения. Сюда относятся гидродинамика и

теория упругости твердых тел. Эти теории избегают явного введения материальных точек и пользуются фикциями, которые в свете основ классической механики могут иметь только приближенное значение.

Эти категории науки имеют большое практическое значение; кроме того, они создали, благодаря распространению их идей в мире математики, формальные вспомогательные орудия (уравнения в частных производных), которые необходимы для последующих попыток формулировки всех аспектов физики способом, отличающимся от ньютоновского своей новизной.

Эти два способа приложения механики принадлежат к так называемой “феноменологической” физике. Этот вид физики характеризуется применением, насколько это возможно, весьма близких к опыту понятий; но именно вследствие этого приходится в значительной мере отказываться от единства фундамента. Теплота, электричество, свет описываются специальными функциями состояния и константами вещества, отличными от механических. Определение взаимной зависимости всех этих переменных было делом скорее эмпирическим. Многие современники Максвелла видели в таком представлении конечную цель физики, которая, думали они, может быть достигнута из опыта чисто индуктивным путем, на основе сравнительно тесного контакта используемых понятий и опыта. С точки зрения теории познания близко к этой позиции стояли Ст. Милль и Э. Мах.

По-моему, величайший подвиг механики Ньютона состоит в том, что ее постоянное применение привело к выходу за рамки феноменологических представлений, особенно в области тепловых явлений. Это произошло в кинетической теории газов и, в более общем виде, в статистической механике. Первая объединила уравнение идеальных газов, вязкость, диффузию газов и установила логическую связь между явлениями, которые, с точки зрения прямого опыта, не имели абсолютно ничего общего.

Статистическая механика дала механическую интерпретацию идей и законов термодинамики и открыла предел приложения ее понятий и законов в классической теории теплоты. Кинетическая теория, которая намного обогнала феноменологическую физику в том, что касается логического единства своих основ, кроме того дала для истинных величин атомов и молекул определенные значения, которые получились различными независимыми методами и были, таким образом, установлены в областях, где они не могли подвергаться серьезному сомнению. Эти решающие успехи были достигнуты за счет согласования атомистических сущностей с материальными точками, т.е. сущностей, спекулятивный и конструктивный характер которых очевиден. Никто не может надеяться когда-либо “прямо воспринимать” атом. Законы, касающиеся переменных, непосредственно связанных с экспериментальными данными (например, температуры, давления, скорости), были выведены из основных идей путем сложных расчетов. Таким образом, физика (по крайней мере, часть ее), первоначально построенная феноменологически, была сведена, будучи основана на механике Ньютона для атомов и молекул, на основу, значительно более удаленную от прямого опыта, но зато более единого характера.

### § 3. Концепция поля

В объяснении оптических и электрических явлений механика Ньютона была намного менее удачлива, чем в вышеуказанных областях. Правда, в своей корпускулярной теории света Ньютон пытался сводить свет к движению материальных точек.

Однако позже, когда явления поляризации, дифракции и интерференции предписывали его теории все более искусственные видоизменения, волновая теория Гюйгенса восторжествовала над ней.

Эта теория, очевидно, обязана своим возникновением явлениям кристаллографической оптики и теории звука, уже достаточно развитой к этому моменту. Нужно признать, что теория Гюйгенса также была основана на классической механике. Но все проникающий эфир, который должен был рассматриваться как носитель волн, и его структура, образованная материальными точками, не могли быть объяснены ни одним из известных явлений. Нельзя было дать ясную картину ни внутренних сил, управляющих эфиром, ни сил, действующих между эфиром и “весомой” материей. Вследствие этого основы этой теории остались навечно темными. Истинной основой теории было уравнение в частных производных, сведение которого к механическим элементам оставалось всегда проблематичным.

В теоретическую концепцию электрических и магнитных явлений были вновь введены особого рода массы, причем допускалось существование сил, действующих между ними на расстоянии, подобно гравитационным силам Ньютона. Этот особый вид материи казался, тем не менее, лишённым фундаментального свойства инерции, и силы, действующие между этими массами и весомой материей, остались неизвестными. К приведенным трудностям добавлялся еще не втискиваемый в схему классической механики полярный характер этих видов материи. Основа теории стала еще менее удовлетворительной, когда узнали об электродинамических явлениях, хотя эти явления позволили физикам объяснить магнитные явления электродинамическими и сделали излишним допущение о магнитных массах. Возмездием за этот успех была необходимость допущения все возрастающей сложности сил взаимодействия между движущимися электрическими массами.

Теория электрического поля Фарадея и Максвелла, благодаря которой удалось выйти из этого затруднительного состояния, представляет, очевидно, наиболее глубокое превращение, которое основание физики претерпело со времени Ньютона. Это был новый шаг в направлении конструктивной спекуляции, который увеличил расстояние между фундаментом теории и тем, что мы можем узнать нашими пятью чувствами. Существование поля проявляется, фактически, только когда вводится электрически заряженное тело. Дифференциальные уравнения Максвелла связывают пространственные и временные дифференциальные коэффициенты электрического поля и магнитного поля. Электрические массы становятся лишь местами, где дивергенция электрического поля не равна нулю. Световые волны появляются как волновые процессы электромагнитного поля в пространстве.

Конечно, Максвелл еще пытался интерпретировать свою теорию поля механически, с помощью моделей эфира. Но эти попытки постепенно отступали и, освобожденные от всех ненужных придатков, фигурируют, по представлениям Г. Герца, лишь на втором плане, так что в этой теории поле заняло в конце концов то главенствующее положение, которое в механике Ньютона занимали материальные точки. Все-таки в начале это было применимо только к электромагнитному полю в пустоте.

В своей начальной фазе теория была еще совершенно неудовлетворительной для объяснения явлений внутри вещества, потому что здесь необходимо было ввести два электрических вектора, связанных соотношениями, зависящими от природы среды и недоступными какому-нибудь теоретическому анализу. Аналогичное положение возникает в связи с магнитным полем и с соотношением между плотностью электрического тока и полем. Для избавления от трудностей Г.А. Лоренц нашел способ, который одновременно указывал путь для электродинамической теории движущихся тел, более или менее свободной от произвольных допущений. Его теория была основана на следующих основных гипотезах.

Повсюду (и внутри весомых тел) местонахождением поля является пустое пространство. Участие материи в электромагнитных явлениях обусловлено тем, что ее элементарные частицы несут неизменные электрические заряды и поэтому подвержены действию ponderomotorных сил и, с другой стороны, обладают свойством порождать поле. Элементарные частицы подчиняются закону движения Ньютона для материальной точки.

Опираясь именно на эту основу, Лоренц добился синтеза механики Ньютона и теории поля Максвелла. Слабость этой теории состоит в том, что она пытается постигнуть явления сочетанием уравнений в частных производных (уравнения Максвелла для поля в пустоте) и уравнений в полных производных (уравнения движения точки); этот прием противоестественный. Мало удовлетворяющая часть теории явно проявляется в необходимости допустить конечность размеров частиц и, кроме того, в необходимости уклоняться от того факта, что существующее на их поверхности электромагнитное поле становится бесконечно большим. Теория была совершенно неспособна объяснить огромные силы, которые удерживают электрические заряды на отдельных частицах. Лоренц принял эти слабости теории, которые он прекрасно знал, чтобы наконец правильно объяснить явления хотя бы в их общих чертах.

Впрочем, у него было одно соображение, которое выходило за рамки его теории. Вблизи электрически заряженного тела имеется магнитное поле, которое вносит вклад (видимый) в его инерцию. Нельзя ли объяснить общую инерцию частиц электромагнитным путем? Ясно, что эта задача могла быть разработана удовлетворительно, только если частицы могли интерпретироваться как регулярные решения электромагнитных уравнений в частных производных. Уравнения Максвелла в их первоначальной форме не позволяли, однако, дать такое описание частиц, потому что соответствующие решения содержали сингулярность. Поэтому физики-теоретики долгое время пытались достигнуть цели видоизменением уравнений Максвелла. Все-таки эти попытки не

увенчались успехом. Так случилось, что в это время цель — построение чисто полевой электромагнитной теории материи — не была достигнута, хотя никакие возражения нельзя было привести против принципиальной возможности достижения такой цели. Новой попытке в этом направлении препятствовало отсутствие какого-либо систематического метода, ведущего к решению. Тем не менее мне кажется достоверным, что в основе последовательной теории поля помимо понятия поля не должно быть никакого понятия, относящегося к частицам. Вся теория должна основываться только на уравнениях в частных производных и их решениях, свободных от сингулярностей.

#### § 4. Теория относительности

Не существует никакого индуктивного метода, который мог бы вести к фундаментальным понятиям физики. Не зная этого обстоятельства, многие исследователи XIX в. стали жертвами серьезной философской ошибки. Очевидно по этой причине молекулярная теория и теория Максвелла могли утвердиться только в сравнительно позднее время. Логическое мышление по необходимости дедуктивное, оно основано на гипотетических представлениях и аксиомах. В какой мере можно ожидать, что последние избраны именно так, чтобы оправдать надежду достижения вследствие этого определенного успеха?

Наиболее удовлетворительное положение безусловно достигается в том случае, когда новые фундаментальные гипотезы навеяны самим экспериментом. Составляющая основу термодинамики гипотеза о невозможности вечного движения представляет пример фундаментальной гипотезы, навеянной экспериментом; это же верно для принципа инерции Галилея. К этой же категории относятся, между прочим, фундаментальные гипотезы теории относительности, которая привела к развитию и неожиданному расширению теории поля и замене основ классической механики.

Успехи теории Максвелла — Лоренца внушили веру в истинность электромагнитных уравнений для пустого пространства, а также, в частности, в утверждение, что свет распространяется в “пространстве” с определенной постоянной скоростью  $c$ . Но является ли закон инвариантности скорости света действительным относительно любой инерциальной системы? Если это не имеет места, тогда одна особая инерциальная система, точнее, состояние особого движения (тела отсчета), отличается от всех остальных.

Против этой идеи восстают, однако, все механические и оптические данные нашего опыта.

По этим соображениям стало необходимым рассматривать истинность закона постоянства скорости света для всех инерциальных систем как принцип. Отсюда вытекает, что пространственные координаты  $x_1, x_2, x_3$  и время  $x_4$  должны преобразоваться согласно “преобразованиям Лоренца”, которые характеризуются инвариантностью выраже-

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$$

если единица времени выбрана так, что скорость света

$$c = 1.$$

Благодаря такому приему время потеряло свой абсолютный характер и стало рассматриваться как алгебраически подобное (почти) пространственным координатам. Абсолютный характер времени, и в частности одновременности, был опровергнут, и четырехмерное описание было введено как единственное адекватное.

Чтобы учесть также эквивалентность всех инерциальных систем относительно всех явлений природы, необходимо постулировать и инвариантность относительно преобразования Лоренца всех систем физических уравнений, выражающих общие законы. Выполнение этого требования составляет содержание частной теории относительности.

Эта теория совместима с уравнениями Максвелла, но она не совместима с основами классической механики. Правда, уравнения движения материальной точки (и вместе с ними выражения для количества движения и кинетической энергии материальной точки) могут быть видоизменены так, чтобы удовлетворить теории; но понятие силы взаимодействия и вместе с ним понятие потенциальной энергии системы потеряли свою основу, так как эти понятия базировались на идее абсолютной одновременности. Поле, поскольку оно определяется дифференциальными уравнениями, заняло место силы.

Так как теория, о которой идет речь, допускает взаимодействие только между полями, становится необходимой теория гравитационного поля. Действительно, не трудно сформулировать теорию, в которой, как и в теории Ньютона, гравитационное поле может быть сведено к скаляру, являющемуся решением уравнения в частных производных. Во всяком случае, экспериментальные факты, выраженные в теории гравитации Ньютона, ведут к другому направлению — общей теории относительности.

Неудовлетворительным пунктом основ классической механики является двоякая роль, которую играет одна и та же постоянная масса; она входит как “инертная масса” в закон движения и как “тяжелая масса” в закон тяготения. В результате этого ускорение тела в гравитационном поле не зависит от содержащейся в нем материи; или в равномерно-ускоренной относительно “инерциальной системы” системе координат движение происходит так же, как оно бы происходило в однородном гравитационном поле относительно “покоящейся” системы координат. Если допустить, что эквивалентность этих двух масс является полной, то этим добиваемся приспособления нашей теоретической мысли к тому факту, что тяжелая и инертная массы тождественны. Отсюда вытекает, что нет никаких доводов считать преимущественность “инерциальных систем” фундаментальным принципом, и мы должны допустить, что нелинейные преобразования координат  $x_1, x_2, x_3, x_4$  тоже с полным правом являются эквивалентными. Если произвести такое преобразование системы координат специальной теории относительности, то метрика

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$$

становится общей (римановой) метрикой Бана  $ds^2 = g_{jk} dx_j dx_k$  (суммирование по  $j$  и  $k$ ), где  $g_{jk}$  симметричные относительно  $j$  и  $k$ , являются некоторыми функциями  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , которые описывают одинаково хорошо как

метрические свойства, так и гравитационное поле относительно новой системы координат.

Прогресс в трактовке основ механики, о котором мы говорили, имеет, однако, как показывает более тщательный анализ, то неудобство, что новые координаты не могут быть интерпретированы как результаты измерений с помощью твердых тел и часов, как это делалось в исходной системе (инерциальной системе с исчезающим гравитационным полем).

Переход к общей теории относительности осуществляется с помощью предположения, что указанное представление свойств поля пространства с помощью функций  $g_{jk}$  (т.е. римановой метрикой) обосновано и в общем случае, когда не существует системы координат, относительно которой метрика приобретает простую квазивеклидову форму специальной теории относительности.

Другими словами, координаты сами по себе уже не выражают метрических соотношений, а только “близость” описанных предметов, координаты которых мало отличаются друг от друга. Все преобразования координат допустимы постольку, поскольку эти преобразования свободны от сингулярностей. Только уравнения, являющиеся ковариантными относительно произвольных в этом смысле преобразований, имеют смысл выражений общих законов природы (постулат общей ковариантности).

Первой целью общей теории относительности является установление предварительной формулировки, которую, пренебрегая требованием, чтобы она сама по себе составляла нечто завершенное, можно было возможно проще связать с “непосредственно наблюдаемыми фактами”. Теория гравитации Ньютона дала подобный пример, ограничившись чистой механикой тяготения. Эта предварительная формулировка может быть охарактеризована следующим образом.

1. Понятие материальной точки и ее массы сохраняется. Формулируется закон ее движения, являющийся переводом закона инерции на язык общей теории относительности. Этот закон представляет собой систему уравнений в полных производных, характеризующей геодезическую линию.
2. Вместо ньютоновского закона гравитационного взаимодействия, мы найдем систему наиболее простых общековариантных дифференциальных уравнений, которую можно установить для тензора  $g_{jk}$ . Она образуется сведением к нулю однократно свернутого тензора кривизны Римана ( $R_{jk} = 0$ ).

Эта формулировка позволяет рассматривать проблему планет. Точнее говоря, она позволяет рассматривать проблему движения материальных точек с практически пренебрегаемой массой в поле тяготения, образованном материальной точкой, которую предполагают не обладающей никаким движением (центральная симметрия). Она не учитывает реакции материальных точек, “движущихся” в гравитационном поле, и не принимает во внимание, каким образом центральная масса образует это поле.

Аналогия с классической механикой показывает, что теорию можно дополнить следующим образом. Возьмем уравнение поля

$$R_{jk} - 0.5 g_{jk} R = - T_{jk}$$

где  $R_{jk}$  обозначает скаляр римановой кривизны,  $T_{jk}$  — тензор энергии материи в феноменологическом представлении. Левая часть уравнения выбрана таким образом, что ее дивергенция тождественно равна нулю. Вытекающее отсюда равенство нулю дивергенции правой части дает “уравнения” материи в форме уравнений в частных производных для случая, когда  $T_{jk}$  вводит для описания материи только четыре функции, совершенно независимых друг от друга (например, плотность, давление и компоненты скорости, где между последними существует тождество, а между давлением и плотностью — уравнение условий).

При такой формулировке вся механика тяготения сведена к решению одной системы ковариантных уравнений в частных производных. Эта теория избегает всех внутренних противоречий, в которых мы упрекали классическую механику. Она достаточна, насколько мы знаем, для выражения наблюдаемых фактов небесной механики. Но она похожа на здание, одно крыло которого сделано из изящного мрамора (левая часть уравнения), а другое — из плохого дерева (правая часть уравнения). Феноменологическое представление материи лишь очень несовершенно заменяет такое представление, которое соответствовало бы всем известным свойствам материи.

Нетрудно объединить теорию электромагнитного поля Максвелла и теорию гравитационного поля, если ограничиться пространством, свободным от весомой материи и электрической плотности. Все, что необходимо сделать, — это взять во втором члене приведенного выше уравнения для  $T_{jk}$  тензор энергии электромагнитного поля в пустом пространстве и присоединить к системе так измененных уравнений записанное в общековариантной форме уравнение поля Максвелла для пустого пространства. При таких условиях между всеми этими уравнениями будет существовать достаточное для обеспечения их прочности число дифференциальных тождеств. Можно добавить, что это необходимое формальное свойство всей системы уравнений оставляет произвольным выбор знака  $T_{jk}$ , что окажется важным в дальнейшем.

Результатом желания достигнуть для фундамента теории наибольшей возможной степени единства были различные попытки объединить гравитационное и электромагнитное поля в единую формальную и однородную картину. Здесь мы должны отметить, в частности, пятимерную теорию Калузы и Клейна. Рассмотрев весьма тщательно эту возможность, я нахожу, что предпочтительнее согласиться с отсутствием внутренней однородности первоначальной теории, ибо не думаю, чтобы совокупность гипотез, составляющих основу пятимерной теории, содержала меньше произвольности, чем первоначальная теория. То же замечание может быть сделано и относительно проективной разновидности теории, весьма тщательно разработанной, в частности, Дантцигом и Паули.

Предыдущие рассуждения относятся исключительно к теории поля, свободного от материи. Как нужно поступить, исходя из этого, чтобы получить полную теорию для материи, состоящей из атомов? В такой теории син-

гулярности безусловно должны быть исключены, потому что без такого исключения дифференциальные уравнения не определяют полностью общее поле. Здесь, в общей теории относительности, мы встречаемся с той же проблемой теоретического представления поля, которая впервые появилась в связи с чисто максвелловской теорией.

Попытка построения частиц, исходя из теории поля, очевидно, вновь ведет к сингулярностям. И здесь была сделана попытка исправить недостаток путем введения новых переменных поля, переработав и расширив систему уравнений поля. Между тем я, в сотрудничестве с доктором Розеном, недавно открыл, что вышеотмеченное простейшее сочетание уравнений гравитационного и электромагнитного полей дает центрально-симметричные решения, которые можно представить свободными от сингулярностей (хорошо известные центрально-симметричные решения Шварцшильда для чисто гравитационного поля и Рейснера для электрического поля с учетом его гравитационного действия). Мы еще вернемся к этому в параграфе 6. Таким образом, представляется возможным получить для материи и ее взаимодействий чисто полевую теорию, избавленную от дополнительных гипотез,— теорию, которая к тому же может быть экспериментально проверена и которая в конце концов подвержена лишь математическим трудностям, правда, очень серьезным.

## § 5. Теория квант и основы физики

Физики-теоретики нашего поколения ожидают, что для физики будет построена новая теоретическая основа, которая воспользуется фундаментальными представлениями, значительно отличающимися от представлений рассмотренной до сих пор теории поля. Основанием для этого служит признание необходимости использования новых методов исследования при математическом представлении явлений, получивших название квантовых.

Тогда как недостатки классической механики, выявленные теорией относительности, связаны с конечностью скорости света (исключается ее бесконечность), в начале нашего века было обнаружено, что между выводами механики и результатами опыта существуют другие противоречия, которые связаны с конечным значением (исключается равенство нулю) постоянной Планка  $h$ . В частности, молекулярная механика требует, чтобы теплоемкость и плотность излучения (монохроматического) твердых тел убывали пропорционально уменьшению их абсолютной температуры; опыт показал, что эти величины убывают быстрее абсолютной температуры. Для теоретического объяснения их поведения необходимо предполагать, что энергия механической системы может принимать не любые, а только определенные дискретные значения, математическое выражение которых всегда зависит от постоянной Планка  $h$ . Больше того, эта концепция была существенно важной для теории атома (теория Бора). Для перехода атомов из одного состояния в другое — с излучением или поглощением и без них — нельзя было указать никакого каузального закона, а только статистический; к такому же заключению пришли и для радиоактивного распада атомов, который тоже тщательно изучался в эту эпоху. Более двух десятилетий физики безуспешно пытались найти единую интерпретацию этого “квантового характера” определенных групп явлений. Такая попытка увенчалась успехом около 10 лет назад путем использова-

ния двух совершенно различных теоретических методов. Одним из этих методов мы обязаны Гейзенбергу и Дираку, другим — Л. де Бройлю и Шредингеру. Математическая эквивалентность обоих методов была вскоре доказана Шредингером. Хочу попытаться наметить ход мысли Л. де Бройля и Шредингера, который ближе к способу мышления физиков, а затем изложить некоторые общие соображения.

Вначале вопрос ставится так: каким образом можно определить для системы дискретный ряд значений энергии  $H$ , определяемой в смысле классической механики (энергия является заданной функцией координат  $q$  и соответствующих количеств движения  $p$ )? Константа Планка  $h$ , связывает частоту  $H/h$  со значениями энергии  $H$ . Следовательно, достаточно дать системе ряд дискретных значений частоты. Это напоминает нам, что в акустике ряд дискретных значений частоты соответствует линейному уравнению в частных производных (если граничные условия заданы), т.е. периодическим синусоидальным решениям. Аналогичным способом Шредингер поставил себе задачу сопоставить заданной функции энергии  $H(q, p)$  уравнение в частных производных для некоторой скалярной функции  $\psi$ , где  $q$  и время  $t$  являются независимыми переменными. Ему это удалось (для комплексной функции  $\psi$ ) в том смысле, что теоретические значения энергии  $H$ , указанные статистической теорией, действительно вытекают удовлетворительным образом из периодического решения уравнения.

Само собой разумеется, что было невозможно сопоставить определенному решению  $\psi(q, t)$  уравнения Шредингера определенное движение материальных точек в механическом смысле. Это означает, что функция  $\psi$  не определяет, по крайней мере точно, историю  $q$  как функции времени. Однако, следуя Борну, физическое значение функций  $\psi$  может интерпретировать следующим образом:  $|\psi|^2$  (квадрат абсолютного значения комплексной функции  $\psi$ ) является плотностью вероятности конфигураций  $q$  в момент  $t$  в рассматриваемой точке конфигурационного пространства. Следовательно, содержание уравнения Шредингера можно характеризовать следующим, легко понимаемым, но не совсем точным образом: оно определяет изменение во времени плотности вероятности статистического ансамбля систем в пространстве конфигураций. Короче говоря, уравнение Шредингера определяет изменение во времени функции  $\psi$  от  $q$ .

Необходимо отметить, что результаты этой теории содержат результаты механики точки как предельные значения, когда длина волны, с которой встречаются при решении задачи Шредингера, повсюду столь мала, что потенциальная энергия меняется практически бесконечно мало при изменениях порядка одной длины волны в конфигурационном пространстве. При этих условиях ясно выделяется следующее: выберем в конфигурационном пространстве область  $G_0$ , большую (по всем размерам) относительно длины волны, но малую по сравнению с практическими размерами конфигурационного пространства. При этих условиях возможно выбрать функцию  $\psi$  так, что для начального момента  $t_0$  она исчезает вне области  $G_0$  и ведет себя, в соответствии с уравнением Шредингера, таким же образом, по крайней мере приближенно, и для последующего времени, но от-

носителем области, которая к этому времени  $t$  перешла в другую область  $G$ . Тогда можно будет с определенной степенью приближения говорить о движении области  $G$  в целом и заменить это движение движением точки в конфигурационном пространстве. Это движение совпадает с требуемыми уравнениями классической механики.

Опыты по интерференции корпускулярных лучей дали блестящее подтверждение того, что предполагаемый теорией волновой характер явлений движения действительно соответствует фактам. Кроме того, теории легко удалось вывести статистические законы перехода системы из одного квантового состояния в другое под действием внешних сил, что, с точки зрения классической механики, казалось чудом. Внешние силы здесь представлены небольшими, зависящими от времени приращениями потенциальной энергии. Тогда как в классической механике такие приращения могут вызвать только соответствующие малые изменения в системе, в квантовой механике они же вызывают изменения любой величины, но с соответственно малой вероятностью; это следствие полностью соответствует опыту. Теория даже позволила понять, по крайней мере в основных чертах, законы радиоактивного распада.

Очевидно, в прошлом никогда не была развита теория, которая, подобно квантовой, дала бы ключ к интерпретации и расчету группы столь разнообразных явлений. Несмотря на это я все-таки думаю, что в наших поисках единого фундамента физики эта теория может привести нас к ошибке: она дает, по-моему, неполное представление о реальности, хотя и является единственной, которую можно построить на основе фундаментальных понятий силы и материальных точек (квантовые поправки к классической механике). Неполнота представления является результатом статистической природы (неполноты) законов. Я хочу сейчас обосновать это мнение.

Я спрашиваю сначала — до какой степени функция  $\psi$  описывает реальное состояние механической системы? Допустим, что  $\psi$  — периодические решения уравнения Шредингера (расположенные в порядке возрастания значений энергии). Я оставляю пока в стороне вопрос о том, в какой степени отдельные  $\psi$  дают полное описание физических состояний. Вначале система находится в состоянии  $\psi_1$  с наименьшей энергией  $E_1$ . Затем в течение конечного промежутка времени на систему действует небольшая возмущающая сила. Для некоторого последующего момента из уравнения Шредингера получаем функцию  $\psi$  в виде:

$$\psi = \sum C_n \psi_n e^{-i E_n t / \hbar}$$

где  $C_n$  — постоянные (комплексные). Если  $\psi_1$  “нормированы”, то  $C_1$  почти равен единице,  $C_2$  и т. д. малы по сравнению с единицей. Можно теперь спросить: описывает ли  $\psi$  действительное состояние системы? Если ответ положительный, то единственное, что нам остается, — это приписать [3] этому состоянию определенную энергию  $E$ , а именно такую, которая не намного превосходит  $E_1$  (во всяком случае  $E_1 < E < E_2$ ). Но такое предположение противоречит опытам Франка и Герца по соударению электронов, если к этому же принято данное Милликоном доказательство дискретной природы электричества. В действительности, эти опыты приводят к заключению, что между двумя квантовыми значениями не существует никаких других значений энергии. Отсюда следует, что наша

функция  $\psi$  никоим образом не описывает однородное состояние системы, а скорее представляет собой статистическое описание, при котором  $C_n$  выражают вероятности отдельных значений энергии. Следовательно, кажется очевидным, что данное Борном статистическое истолкование квантовой теории является единственно возможным. Функция ни в коем случае не описывает состояние, свойственное одной единственной системе; она относится скорее к нескольким системам, т. е. к “ансамблю систем”, в смысле статистической механики. Если, исключая некоторые особые случаи, функция дает только статистические данные об измеримых величинах, то причина состоит не только в том, что операция измерения вносит неизвестные элементы, которые можно уловить лишь статистически, а в самом факте, что функция  $\psi$  ни в коем смысле не описывает состояния одной отдельной системы.

Такая интерпретация устраняет также и указанный недавно мною и моими двумя сотрудниками парадокс, относящийся к следующей проблеме.

Рассмотрим механическую систему, состоящую из двух отдельных систем  $A$  и  $B$ , взаимодействующих только в течение ограниченного времени. Пусть задана функция  $\psi$  до взаимодействия. Тогда уравнение Шредингера даст функцию  $\psi$  после взаимодействия. Определим теперь физическое состояние подсистемы  $A$  настолько полно, насколько это допускается измерениями. Тогда квантовая механика позволяет нам определить функцию  $\psi$  для подсистемы  $B$  по сделанным измерениям и функции  $\psi$  для всей системы. Это определение, однако, дает результат, который зависит от того, какие определяющие величины, характеризующие состояние  $A$ , измерялись (например, координаты или количества движения). Поскольку после взаимодействия для  $B$  может существовать только одно физическое состояние, которое нельзя себе разумно представить зависящим от отдельных измерений, произведенных над системой  $A$ , отделенной от  $B$ , можно заключить, что функции  $\psi$  нельзя однозначно сопоставить физическое состояние. Это сопоставление нескольких функций  $\psi$  одному и тому же физическому состоянию системы  $B$  вновь показывает, что функция не может интерпретироваться как описание (полное) физического состояния одной отдельной системы. Здесь также все трудности исчезают, если функция  $\psi$  сопоставляется ансамблю систем [4].

Тот факт, что квантовая механика позволяет столь просто получить выводы, касающиеся прерывных переходов (кажущихся) из одного общего состояния в другое, не давая фактически представления об отдельных процессах, связан с другим фактом, а именно, что теория в действительности оперирует не с отдельной системой, а с ансамблем систем. Коэффициенты  $C_n$  в нашем первом примере очень мало меняются под действием внешних сил. Такая интерпретация квантовой механики позволяет понять, почему эта теория так легко объясняет способность малых возмущающих сил вызывать изменения любой величины в физическом состоянии системы. Такие возмущающие силы вызывают фактически лишь соответствующие малые изменения статистической плотности ансамбля систем, а следовательно, бесконечно малые изменения функции  $\psi$ ; математическое выражение этих изменений представляет гораздо меньше трудностей, чем представляло математическое выраже-

ние конечных изменений, претерпеваемых отдельными системами. Что происходит в отдельной системе, остается, правда, при такой манере мышления совершенно невыясненным; статистическая точка зрения совершенно исключает из рассмотрения эти таинственные процессы.

Но теперь я спрашиваю: неужели какой-нибудь физик действительно верит, что нам не удастся узнать что-либо о важных внутренних изменениях в отдельных системах, об их структуре и причинных связях? И это несмотря на возникшие благодаря замечательным открытиям камеры Вильсона и счетчика Гейгера возможности исследования? Думать так логически допустимо, но это настолько противоречит моему научному инстинкту, что я не могу отказаться от поисков более полной концепции.

К этому мы хотели бы добавить некоторые соображения иного рода, которые также свидетельствуют против идеи, что введенные квантовой механикой методы способны создать основу, пригодную для всей физики. В уравнении Шредингера абсолютное время и потенциальная энергия играют решающую роль, тогда как теорией относительности эти два понятия признаны в принципе недопустимыми. Чтобы избежать этих трудностей, нужно основать теорию на понятии поля и законах полей, а не на силах взаимодействия. Это приводит к распространению статистических методов квантовой механики на поля, т. е. на системы с бесконечным числом степеней свободы. Хотя во всех сделанных до сих пор попытках ограничивались линейными уравнениями, которые, как мы знаем по данным общей теории относительности, не достаточны, встретившиеся при осуществлении уже этих весьма остроумных попыток осложнения ужасающе велики. Они возрастают чрезвычайно, если мы хотим удовлетворить требованиям общей теории относительности, правомочность которой в принципе никем не может оспариваться.

Необходимо отметить, конечно, что введение пространственно-временного континуума может считаться противостественным, если иметь в виду молекулярную структуру всего происходящего в микромире. Утверждают, что успех метода Гейзенберга может быть приведен к чисто алгебраическому методу описания природы, т. е. исключению из физики непрерывных функций. Но тогда нужно будет в принципе отказаться от пространственно-временного континуума. Можно думать, что человеческая изобретательность в конце концов найдет методы, которые позволят следовать этому пути. Но в настоящее время такая программа смахивает на попытку дышать в безвоздушном пространстве.

Нет сомнения, что в квантовой механике имеется значительный элемент истины и что она станет пробным камнем для любой будущей теоретической основы, из которой она должна будет быть выведена как частный случай, подобно тому, как электростатика выводится из уравнений Максвелла для электромагнитного поля или термодинамика из классической механики. Однако я не думаю, что квантовая механика является исходной точкой поисков этой основы, точно так же, как нельзя, исходя из термодинамики (или, соответственно, из статистической механики), прийти к основам механики.

Учитывая такое положение, кажется вполне оправданным серьезное рассмотрение вопроса о том, нельзя ли каким-нибудь образом привести в соответствие основу физики

поля с данными квантовой теории? Не является ли она единственной основой, которая, в соответствии с современными возможностями математики, может быть адаптирована к требованиям общей теории относительности? Господствующая среди современных физиков вера в совершенную безнадежность таких попыток коренится в необоснованном мнении, что в первом приближении такая теория должна привести к уравнениям классической механики для движения частиц или по крайней мере к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Фактически до настоящего времени нам ни разу не удалось теоретически представить частицы с помощью полей, свободных от сингулярностей, и мы не можем ничего сказать по поводу поведения таких существ. Однако одно достоверно: если теории поля удастся представить частицы без сингулярностей, то поведение этих частиц во времени будет однозначно определяться дифференциальными уравнениями поля.

## § 6. Теория относительности и частицы

Я хочу теперь показать, что, согласно общей теории относительности, существуют свободные от сингулярностей решения уравнений поля, причем эти решения можно интерпретировать как представляющие частицы. Я ограничиваюсь здесь случаем нейтральных частиц, так как совместно с доктором Розеном в недавней работе подробно рассматривал этот вопрос, а также потому, что в этом случае можно полностью выявить суть проблемы.

Гравитационное поле полностью описывается тензором  $g_{ik}$ . В трехиндексном символе  $\Gamma_{ijk}$  также появляются контраварианты  $g^{ij}$ , определяемые как частные от деления миноров  $g_{ij}$  на детерминант  $g = |\det g_{ij}|$ . Для того чтобы  $R_{ik}$  были определенными и конечными, недостаточно задать систему координат в окрестности любой части континуума так, чтобы  $g_{ij}$  и их первые производные были бы непрерывными и дифференцируемыми; необходимо также, чтобы детерминант нигде не равнялся нулю. Это последнее ограничение все-таки исключается, если дифференциальные уравнения  $R_{ik} = 0$  заменить на  $g^2 R_{ik} = 0$ , левые части которых являются целыми рациональными функциями  $g_{ik}$  и их производных.

Эти уравнения имеют центрально-симметричные решения, указанные Шварцшильдом,

Это решение имеет сингулярность при  $r = 2m$ , так как коэффициент при  $dr^2$  (т. е.  $g_{11}$ ) становится бесконечным на этой гиперповерхности. Если теперь заменить переменную  $r$  на  $\rho$  по формуле

$$\rho^2 = r - 2m$$

получим ...

Это регулярное решение при всех значениях  $\rho$ . Правда, исчезновение коэффициента при  $dt(g_{44})$  при  $\rho = 0$  приводит к равенству нулю детерминанта  $g$  при этом значении; но при принятом методе записи уравнений поля это не образует сингулярности.

Если  $\rho$  меняется от  $-\infty$  до  $+\infty$ ,  $r$  меняется от  $+\infty$  до  $r = 2m$  и обратно до  $+\infty$ , тогда как значениям  $r < 2m$  не соответствуют никакие действительные значения  $\rho$ . Отсюда

следует, что решение Шварцшильда становится регулярным, если представить физическое пространство состоящим из двух “оболочек”, граничащих вдоль гиперповерхности  $\varphi = 0$ , т. е.  $r = 2m$ , тогда как на самой гиперповерхности детерминант равен нулю. Будем называть такую связь между двумя оболочками (тождественными) “мостом”. Следовательно, существование такого моста между двумя оболочками в конечной области соответствует существованию нейтральной материальной частицы, описанной способом, свободным от сингулярностей.

Решение проблемы движения нейтральных частиц, очевидно, сводится к нахождению решений тех уравнений гравитации (написанных без знаменателей), которые содержат несколько мостов.

Изложенная выше концепция соответствует, а priori, атомистической структуре материи, поскольку мосты по своей природе дискретны. Кроме того, мы видим, что константа массы  $m$  нейтральных частиц должна быть существенно положительной, так как отрицательным значениям  $m$  не может соответствовать какое-либо свободное от сингулярностей решение Шварцшильда. Только исследование проблемы многих мостов может показать, дает ли этот теоретический метод объяснение эмпирически установленному равенству масс частиц в природе и учитывает ли он все факты, столь превосходно охваченные квантовой механикой.

Аналогичным образом можно показать, что комбинированные уравнения гравитации и электричества (при надлежащем выборе знака электрических членов в уравнениях гравитации) дают свободное от сингулярностей мостовое представление электрической частицы. Наиболее простое решение этого рода относится к электрической частице, не имеющей гравитационной массы.

До тех пор, пока не преодолены значительные математические трудности проблемы многих мостов, нельзя ничего утверждать о пользе теории с точки зрения физика. Тем не менее она несомненно является первой попыткой последовательной разработки полевой теории, дающей возможность объяснить свойства вещества. В пользу этой попытки говорит и то обстоятельство, что она основана на релятивистских уравнениях поля, наиболее простых из известных в настоящее время.

#### Резюме

Физика представляет собой развивающуюся логическую систему мышления, основы которой можно получить не выделением их какими-либо индуктивными методами из пережитых опытов, а лишь свободным вымыслом. Обоснование (истинность) системы основано на доказательстве применимости вытекающих из нее теорем в области чувственного опыта, причем соотношения между последними и первыми можно понять лишь интуитивно. Эволюция происходит в направлении все увеличивающейся простоты логических основ. Больше того, чтобы приблизиться к этой цели, мы должны решиться признать, что логическая основа все больше и больше удаляется от данных опыта, а мысленный путь от основ к вытекающим из них теоремам, коррелирующимся с чувственными опытами, становится все более трудным и длинным.

Наша цель состояла в том, чтобы возможно короче наметить картину развития основных понятий в их связи с опытными фактами и усилиями достичь внутреннего совершенства системы. Было также необходимо выяснить с помощью этих соображений современное состояние вещей так, как оно мне представляется (схематическое историческое изложение неизбежно носит некоторую личную окраску).

Я стремился показать, каким образом связаны между собой и с природой эксперимента понятия телесного объекта, пространства, субъективного и объективного времени. В классической механике понятия пространства и времени независимы друг от друга. Понятие телесного объекта заменялось в самой основе понятием материальной точки, благодаря чему механика стала существенно атомистической. Свет и электричество порождали непреодолимые трудности, когда пытались сделать механику основой для всей физики. Это приводит к теории электрического поля и к попытке основать всю физику на понятии поля (после попытки компромисса с классической механикой). Эта попытка ведет к теории относительности (превращение понятий пространства и времени в континуум с метрической структурой).

Я старался, далее, доказать, почему, по моему мнению, квантовая теория не выглядит способной дать фундамент, полезный для физики. Попытки рассматривать теоретическое квантовое описание как полное описание отдельных физических систем или отдельных событий приводят к противоречиям.

С другой стороны, теория поля до сих пор не в состоянии дать объяснение молекулярной структуры материи и квантовых явлений. Тем не менее было показано, что убеждение в неспособности теории поля разрешить своими методами эти проблемы основывается на некотором предубеждении.

#### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Положение людей науки отягощается тем, что различие языков тормозит их взаимопонимание. Жажда познания космических связей воспринимаемых нами в виде символов, которые доставляются нашими несовершенными чувствами, сглаживает эти трудности. Никогда еще стремление к познанию истины не было таким сильным, как теперь, и пока оно будет существовать, можно смотреть в будущее с надеждой. Такая точка зрения помогает смягчить страдания человечества, а также является существенной для преодоления современного кризисного периода.

В физической науке существовали единые понятия. Ныне они расщепились на две ветви, одна из которых принадлежит квантовой теории, вторая — (релятивистской) теории поля. Их объединение желательно, но еще не достигнуто. Вторая ветвь могла бы развиваться на основе идей Фарадея — Максвелла о замене понятия массы понятием электромагнитного поля. Идею, что вещество можно рассматривать как места особого сгущения поля, осуществить пока не удалось. Однако сохраняется стремление к тому, чтобы многообразие яв-

лений сводилось в чисто теоретическую систему из как можно меньшего числа элементов.

Так возникли специальная теория относительности и общая теория относительности. Задача последней заключается в однозначном описании движения точки в пространстве и времени без использования вспомогательного понятия отклоняющей силы. Необходимо найти систему координат, в которой движение точки выглядит прямолинейным и равномерным. Это представляется несколько нелогичным. Мах ясно понимал это и искал формулировку, описывающую движение без ссылки на систему координат. Теория относительности не исключает систему координат, но выбирает одну, соответствующую условиям, и пытается найти законы движения, независимые от выбора системы координат.

Без введения Фарадеем и Максвеллом понятия электромагнитного поля теория относительности была бы невозможна. Это понятие ведет к понятию гравитационного поля, которое объясняет явления тяготения, но включает в себя электромагнитные явления. Правда, хотя их и удалось уложить в рамки теории относительности, но в архитектурном построении теории отсутствовало логическое единство.

Представив себе мысленно, с целью получить возможно более простые математические формулировки, что вещество во Вселенной распределяется всюду равномерно с некоторой средней плотностью, можно считать, что оно находится внутри большого шара, количество вещества в котором пропорционально третьей степени радиуса, а поверхность — второй степени радиуса. В центре шара напряженность гравитационного поля равна нулю, но возрастает вдоль радиуса к внешней поверхности пропорционально радиусу шара. Следовательно, гравитационное поле снаружи все усиливается и усиливается. Однако такой мир не мог бы существовать, если сохраняется закон тяготения Ньютона. Эту трудность можно преодолеть, добавляя в формулы новый член. Из уравнений следует, что пространство должно быть неевклидовым, т. е. определяемым с помощью прямолинейной прямоугольной системы координат, но сферическим. Между радиусом этого сферического мира и средней плотностью существует определенное соотношение. Чем меньше плотность массы, тем больше радиус. Зная среднюю массовую плотность, можно было бы определить и размеры мира.

### III

Астрономия заключает из опыта, что чем дальше находятся от нас небесные светила, тем меньше их яркость, затем, что они движутся от нас тем быстрее, чем дальше они расположены. Это нашло бы свое выражение в сдвиге спектральных линий по сравнению с их положением в спектре, получаемом на Земле. Открытие и спектроскопическое изучение внегалактической туманности наблюдателями обсерватории Маунт-Вильсон подтвердило это предположение. Это привело одного русского математика [5] к мысли, что видимая материя находится в состоянии расширения. Наблюдения де Ситтера и других показали, что это движение расширения вполне вероятно. Теперь напрашивалась мысль — нельзя ли объяснить его, применяя старое уравнение гравитации без прибавления каких-либо новых членов? Оказалось, что тогда можно сразу вычислить расширение, предполагая, что сдвиг

спектральных линий действительно соответствует движению небесного тела

При этом значение радиуса мира по порядку величины исчисляется сотнями миллионов световых лет. Этот порядок величины приблизительно соответствует значениям, доступным нам с нашими инструментами, а средняя плотность изображается дробью в числителе которой стоит единица, а в знаменателе единица с 26 или 27 нулями. Если мир расширяется, то его объем должен был начинаться с нуля. Однако это кажется невозможным. Для достижения современной величины тогда потребовалось бы от одного до десяти миллиардов лет. Возраст же Земли, определенный по радиевому методу, составляет около 800 миллионов лет [6]. Следовательно, Земля должна была образоваться, когда началось расширение. А будущее? Уравнения предсказывают, что расширение на определенной стадии кончится и тогда должно начаться сжатие, которое будет продолжаться до нулевого объема.

### IV

Попытки найти единые законы материи, породить теорию поля и квантовую теорию не прекращались. Речь идет о том, чтобы найти структуру пространства, удовлетворяющую условиям, выдвигаемым обеими теориями. Результатом оказалось кладбище погребенных надежд. Я также с 1928 г. пытался найти решение, но снова отказался от этого пути. В противовес этому удалось построение теории на основе идеи, выдвинутой наполовину моим сотрудником профессором доктором Майером. Уже десять лет назад один француз высказал интересную мысль — рассматривать мир как пятимерное пространство [7]. В этом случае получается теория, в которой находят свое место и электромагнитные явления, причем архитектурное единство теории не нарушается. Однако я и Майер полагаем, что пятое измерение не должно появляться. Оно используется только математически для построения компонент, применение которых дает уравнения для электромагнитных явлений, совершенно аналогичные тем, которые получаются в теории относительности для закона тяготения. При этом, конечно, выясняется одна трудность, которая, однако, преодолевается новым математическим построением, посредством которого можно ввести соотношение между гипотетическим пятимерным пространством и четырехмерным пространством. Таким образом удалось охватить логическим единством и гравитационное и электромагнитное поля.

Однако надежда не сбылась. Я полагал, что если бы удалось найти этот закон, то получилась бы теория, применимая к квантам и материи. Но это не так. Построенная теория, по-видимому, разбивается о проблему материи и квантов. Между обеими идеями все еще сохраняется пропасть.

[1] Это в природе вещей, что мы не можем говорить об этих вопросах иначе, чем с помощью созданных нами понятий, которые недоступны определению. Тем не менее существенно, чтобы мы пользовались только понятиями, соответствие которых нашему опыту находится вне сомнений.

[2] Этот недостаток теории мог быть устранен только такой формулировкой механики, которая была бы действительно во всем До. Это был один из шагов, которые привели к общей теории относительности. Другой недостаток, также устраненный введением общей

теории относительности, состоял в том, что механика сама по себе не дает основания для равенства тяжелой и инертной масс материальной точки.

- [3] Потому что, согласно прочно установленному следствию теории относительности, энергия системы (в покое) равна ее массе (как целого). А последняя должна иметь вполне определенное значение
- [4] Операция измерения  $A$ , например, также содержит в себе переход к более ограниченному ансамблю систем. Последний (а значит, и его функция ? зависит от того, с какой точки зрения было произведено ограничение ансамбля систем.
- [5] Л. А. Фридмана.— Прим. ред.
- [6] Около 5 млрд. лет по современным оценкам.— Прим. ред.
- [7] Т. Калуза.— Прим. ред.