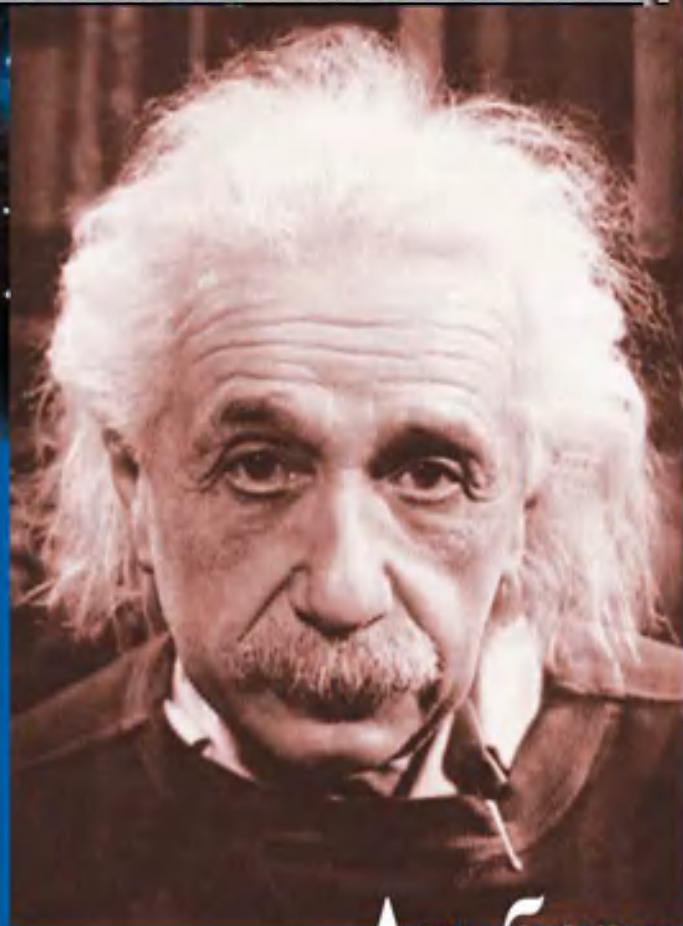


границы
мира



Альберт
ЭЙНШТЕЙН
Мир и физика

Библиотека журнала «Экология и жизнь»



Альберт Эйнштейн

МИР И ФИЗИКА

Сборник

«Тайдекс Ко»

Москва

2003

ББК 22.3г
Э11

Федеральная целевая программа «Культура России»
Подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания в России»

Серия «Грани мира» основана в 2002 г.

Составитель А.Л. Самсонов

Издательство благодарит профессора Клауса Тиссена (Германия)
за помощь в подготовке сборника.

Эйнштейн А.
Э11 Мир и физика. Сборник. — М.: Тайдекс Ко, 2003. —
296 с., с илл. (Библиотека журнала «Экология и жизнь».
Серия «Грани мира»).
ISBN 5-94702-013-0

В этой книге Альберт Эйнштейн предстанет перед читателем не только как великий физик, но и выдающийся мыслитель, рассуждающий о природе реальности, изучаемой в физике, о Добре и Зле, войне и мире, науке и Боге. Читатель также найдет в книге знаменитую полемику с Нильсом Бором по поводу принципа неопределенности и популярное изложение теории относительности, подготовленное самим Эйнштейном.

Книга снабжена блоком иллюстраций из жизни Эйнштейна, портретами его коллег-физиков, а также их воспоминаниями об Эйнштейне.

Для широкого круга читателей.

ББК 22.3г

ISBN 5-94702-013-0

© Составление: Самсонов А.Л., 2003

© Оформление: «Тайдекс Ко», 2003

*К 125-летию со дня рождения
Альберта Эйнштейна*

Тексты печатаются по изданиям:

Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. II, III, IV. — М., Наука, 1966–1967.

Эйнштейн А. Физика и реальность. (Сборник статей) — М., Наука, 1965.

Бор Н. Собрание научных трудов. Т. 2. — М., Наука, 1971.

Борн М. Размышления и воспоминания физика. — М., Наука, 1977.

Борн М. Физика в жизни моего поколения. — М., Изд. ин. лит., 1963.

Гейзенберг В. Физика и философия. — М., Изд. ин. лит., 1963.

Перевод с английского и немецкого выполняли:

И.А. Акчурин, Э.П. Андреев, В.В. Бибихин, Ю.А. Данилов,
В.В. Иванов, И.Я. Итенберг, А.Н. Лермантова, А.Г. Любина,
В.И. и О.И. Мацарские, М.Н. Морозов, А.А. Сазыкин,
А.Л. Самсонов, С.Г. Суворов, В.А. Фок, А.М. Френк, А.Г. Чичерин

Часть 1

ВОСПОМИНАНИЯ,
ДИАЛОГИ, СПОРЫ

Мотивы научного исследования. Пролог

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: плоды своих мыслей они приносят здесь в жертву только в утилитарных целях. Если бы посланный Богом ангел пришел в храм и изгнал из него тех, кто принадлежит к этим двум категориям, то храм катастрофически опустел бы. Все-таки кое-кто из людей как прошлого, так и настоящего времени в нем бы остался. К числу этих людей принадлежит и наш Планк, и поэтому мы его любим.

Я хорошо знаю, что мы только что с легким сердцем изгнали многих людей, построивших значительную, 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 вьющихся растений. Этим людей 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

Motiv des Forschens. В сб. «Zu Max Plancks — 60. Geburtstag: Ausprachen in der Deutsche physikalische Gesellschaft». Karlsruhe, 1918, 29–32; Prologue. В кн.: *Planck M. Where is science going?* London, 1933, 9–14.

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 личных переживаний в мир объективного видения и понимания. Эту причину можно сравнить с тоской, неотразимо влекущей горожанина из шумной и мутной окружающей среды к тихим высокогорным ландшафтам, где взгляд далеко проникает сквозь неподвижный чистый воздух и наслаждается спокойными очертаниями, которые кажутся предназначенными для вечности.

Но к этой негативной причине добавляется и позитивная. Человек стремится каким-то адекватным способом создать в себе простую и ясную картину мира для того, чтобы оторваться от мира ощущений, чтобы в известной степени попытаться заменить этот мир созданной таким образом 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 столь скромного занятия гордого названия «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; в принципе это мнение безусловно верно. Но история показала, что из всех мыслимых построений в данный момент только одно оказывается преобладающим. Никто из тех, кто действительно углубляется 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 знаем, отдался Планк общим проблемам науки, не позволяя себе отклоняться ради более 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 религиозности или влюбленности: ежедневное старание проистекает не из какого-то намерения или программы, а из непосредственной потребности.

Он здесь вместе с нами, наш дорогой Планк; он внутренне посмеивается над этим моим ребяческим манипулированием фонарем Диогена. Наша симпатия к нему не нуждается в банальном обосновании. Пусть любовь к науке продолжает украшать 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 стройную систему.

1918 г.

* * *

Много разных людей посвящало себя науке, но не все посвящали себя науке ради самой науки. Некоторые входили в ее храм потому, что это давало им возможность проявить свое дарование. Для этой категории людей наука является своего рода спортом, занятие которым доставляет им радость подобно тому, как атлету доставляют удовольствие упражнения, развивающие силу и ловкость. Существует другая кате-

горя людей, вступающих в храм науки, с тем чтобы предоставить в ее распоряжение свой мозг, получить за это приличное вознаграждение. Такие люди становятся учеными лишь случайно, в силу обстоятельств, обусловивших выбор их жизненного пути. Если бы обстоятельства, сопутствовавшие этому выбору, были иными, эти люди могли бы стать политическими деятелями или крупными дельцами. Если бы с небес спустился ангел и изгнал из храма науки всех, кто принадлежит к этим двум категориям, то боюсь, что в храме науки почти никого бы не осталось. Но все же несколько жрецов остались бы в храме — кое-кто от прошлых времен, а кое-кто и от нашего времени. Среди последних был бы и наш Планк, и за это мы его так любим.

Я отдаю себе полный отчет в том, что при такой чистке были бы изгнаны многие из построивших значительную, может быть, даже большую часть храма науки. Но в то же время ясно, что если бы люди, посвятившие себя науке, относились только к тем двум категориям, о которых я говорил выше, то ее здание никогда бы не выросло до тех величественных размеров, которые оно имеет в настоящее время, точно так же, как не смог бы подняться лес, состоящий из одних лишь ползучих растений.

Но забудем о них. *Non ragionam di log**. Обратимся к тем, кто снискал расположение ангела. Большею частью это странные, молчаливые, одинокие люди. И все же, несмотря на то, что они похожи друг на друга, различие между ними гораздо сильнее, чем различие между теми, кого наш гипотетический ангел изгнал из храма науки.

Что заставило их посвятить свою жизнь служению науке? На этот вопрос трудно ответить вообще и никогда нельзя было бы ответить просто и категорично. Лично я склонен думать вместе с Шопенгауэром, что одним из сильнейших мотивов, побуждающих людей посвящать себя искусству и науке, является стремление избежать повседневности с ее серостью и мертвящей скукой и сбросить с себя оковы своих собственных преходящих желаний, нескончаемой вереницей сменяющих друг друга, если все помыслы сосредоточены на различного рода будничных мелочах и ограничены только ими.

К этому негативному мотиву следует добавить и позитивный. Природа человека такова, что он всегда стремился составить для себя простой и не обремененный излишними подробностями образ окружающего его мира. При этом он пытался построить картину, которая дала бы до какой-то степени реальное отображение того, что человеческий разум видит в природе. Именно это делают и поэт, и художник, и философ, и естествоиспытатель, причем каждый по-своему. В созданную им картину мира человек помещает центр тяжести своей души и таким

* Эквивалентно предыдущей фразе. — *Прим. ред.*

образом находит в ней тот покой и то равновесие, которые не может найти в тесном кругу повседневной жизни, требующем с его стороны непрерывных реакций.

Какое место среди различных картин мира, созданных художником, философом и поэтом, занимает картина мира, созданная физиком-теоретиком? Главной ее особенностью должна быть особая точность и внутренняя логическая непротиворечивость, которые можно выразить только на языке математики. С другой стороны, физик должен быть жестоким по отношению к материалу, который он использует. Ему приходится довольствоваться воспроизведением лишь наиболее простых процессов, доступных нашему чувственному восприятию, ибо более сложные процессы человеческий разум не может представить себе с той чрезвычайной точностью и логической последовательностью, которые столь высоко ценимы физиком-теоретиком.

Даже пожертвовав полнотой, мы должны обеспечивать простоту, ясность и точность соответствия между изображением и изображаемым предметом. Если отдавать себе отчет в том, насколько мала та часть природы, которую можно охватить и выразить с помощью точных формулировок, опуская все сколько-нибудь тонкое и сложное, то естественно задать вопрос: что же привлекательного может быть в подобной работе? Заслуживает ли результат подобного весьма ограничительного отбора громкого названия картины мира?

Я думаю, что заслуживает, ибо большинство общих законов, на которых зиждется логическая структура теоретической физики, надлежит учитывать при изучении даже наиболее простых явлений природы. Если бы эти законы были полностью известны, то теорию любого явления природы, включая теорию самой жизни, можно было бы вывести из них с помощью одних лишь абстрактных рассуждений. Я думаю, что *теоретически* такой вывод был бы возможен, но на практике такой процесс вывода лежит вне возможностей человеческого мышления. Поэтому тот факт, что в науке мы вынуждены довольствоваться неполной картиной физического мира, обусловлен не природой этого мира, а нашими собственными особенностями.

Таким образом, высшая задача физика состоит в открытии наиболее общих элементарных законов, из которых можно было бы логически вывести картину мира. Однако не существует логического пути открытия этих элементарных законов. Единственным способом их постижения является интуиция, которая помогает увидеть порядок, кроющийся за внешними проявлениями различных процессов. Эта способность к угадыванию развивается с практикой. Но можно ли утверждать, что разные физические теории могут быть в равной мере справедливыми и допустимыми? С теоретической точки зрения в этой

идеи нет ничего нелогичного. Но история науки показала, что на любом этапе развития физики одна из мыслимых теоретических структур доказывала свое превосходство над всеми остальными.

Для каждого опытного исследователя ясно, что теоретическое построение в физике зависит и определяется миром чувственного восприятия, хотя не существует логического пути, следуя по которому мы могли бы от чувственного восприятия прийти к принципам, лежащим в основе теоретической схемы. Кроме того, синтез понятий, являющийся отпечатком эмпирического мира, можно свести к нескольким фундаментальным законам, на которых логически строится весь синтез. При каждом существенном продвижении вперед физик обнаруживает, что фундаментальные законы все более и более упрощаются по мере того, как развиваются экспериментальные исследования. Он удивляется, когда замечает, сколь стройный порядок возникает из того, что прежде казалось хаосом. Этот порядок нельзя считать связанным с работой его собственного интеллекта; он обусловлен одним свойством, присущим миру восприятий. Лейбниц удачно назвал это свойство «изначальной гармонией».

Физики иногда упрекают философов, занимающихся теорией познания, за то, что те не вполне оценивают этот факт. И я думаю, что именно в этом состоит смысл дискуссии, в течение нескольких лет продолжавшейся между Эрнстом Махом и Максом Планком. Последний, по всей видимости, чувствовал, что Мах не вполне оценивал стремление физиков к восприятию этой «изначальной гармонии». Именно это стремление было неиссякаемым источником терпения и настойчивости, с которой Планк отдавался самым простым вопросам, связанным с физической наукой, в то время как он мог бы поддаться искушению и пойти иными путями, которые привели бы к более привлекательным результатам.

Я часто слышал, как коллеги Планка связывали его отношение к науке с его необычайными личными дарованиями, его энергией и пунктуальностью. Думаю, что они ошибаются. То состояние ума, которое служит движущей силой в этом случае, напоминает состояние фанатика или влюбленного. Усилия, затрачиваемые в течение длительного периода времени, стимулируются не каким-то составленным заранее планом или целью. Это вдохновение проистекает из душевной потребности.

Думаю, что Макс Планк посмеялся бы над тем, как по-детски я блуждаю здесь с фонарем Диогена. Но что я могу сказать о его величии? Величие Планка не нуждается в жалком подтверждении с моей стороны. Его труд дал один из самых мощных толчков прогрессу науки. Его идеи будут жить и работать до тех пор, пока существует физическая наука. И я надеюсь, что пример его личной жизни послужит не меньшим стимулом для последующих поколений ученых.

1932 г.

Автобиографические заметки

Вот я здесь сижу и пишу на 68-м году жизни что-то вроде собственного некролога. Делаю я это не только потому, что меня уговорили; я и сам думаю, что показать своим ищущим собратьям, какими представляются в исторической перспективе собственные стремления и искания, — дело хорошее. После некоторого размышления я, однако, почувствовал, как неполна и несовершенна должна оказаться такая попытка. Ведь как бы ни была коротка и ограничена трудовая жизнь, как бы ни преобладали в ней ошибки и блуждания, все же отобрать и изложить то, что этого заслуживает, — задача нелегкая. Когда человеку 67 лет, то он не тот, каким был в 50, 30 и 20 лет. Всякое воспоминание подкрашено тем, что представляет человек сейчас, а нынешняя точка зрения может ввести в заблуждение. Это соображение могло бы отпугнуть. Но, с другой стороны, из собственных переживаний можно перепнуть многое такое, что недоступно сознанию другого.

Еще будучи довольно скороспелым молодым человеком, я живо осознал ничтожество тех надежд и стремлений, которые гонят сквозь жизнь большинство людей, не давая им отдыха. Скоро я увидел и жестокость этой гонки, которая, впрочем, в то время прикрывалась тщательнее, чем теперь, лицемерием и красивыми словами. Каждый был вынужден участвовать в этой гонке ради своего желудка. Участие это могло удовлетворить желудок, но никак не всего человека как мыслящего и чувствующего существа. Выход отсюда указывался прежде всего религией, которая насаждается всем детям традиционной машиной воспитания. Таким путем я, хотя и был сыном совсем нерелигиозных (еврейских) родителей, пришел к глубокой религиозности, которая, однако, уже в возрасте 12 лет резко оборвалась. Чтение научно-популярных книжек привело меня вскоре к убеждению, что в

Autobiographisches (Autobiographical Notes). В кн.: «Albert Einstein — Philosopher-Scientist», ed. by P.A. Schilpp, Evanston (Illinois), 1945, 1–95 .

библейских рассказах многое не может быть верным. Следствием этого было прямо-таки фанатическое свободомыслие, соединенное с выводами, что молодежь умышленно обманывается государством; это был потрясающий вывод. Такие переживания породили недоверие ко всякого рода авторитетам и скептическое отношение к верованиям и убеждениям, жившим в окружавшей меня тогда социальной среде. Этот скептицизм никогда меня уже не оставлял, хотя и потерял свою остроту впоследствии, когда я лучше разобрался в причинной связи явлений.

Для меня ясно, что утраченный таким образом религиозный рай молодости представлял первую попытку освободиться от пут «только личного», от существования, в котором господствовали желания, надежды и примитивные чувства.

Там, вовне, существовал большой мир, существующий независимо от нас, людей, и стоящий перед нами, как огромная вечная загадка, доступная, однако, по крайней мере отчасти, нашему восприятию и нашему разуму. Изучение этого мира манило, как освобождение, и я скоро убедился, что многие из тех, кого я научился ценить и уважать, нашли свою внутреннюю свободу и уверенность, отдавшись целиком этому занятию. Мысленный охват, в рамках доступных нам возможностей, этого внеличного мира представлялся мне наполовину сознательно, наполовину бессознательно как высшая цель. Те, кто так думал, будь то мои современники или люди прошлого, вместе с выработанными ими взглядами, были моими единственными и неизменными друзьями. Дорога к этому раю была не так удобна и завлекательна, как дорога к религиозному раю, но она оказалась надежной, и я никогда не жалел, что по ней пошел.

То, что я сейчас сказал, верно только в известном смысле, подобно тому, как рисунок, состоящий из немногих штрихов, только в ограниченном смысле может передать сложный предмет, с его запутанными мелкими подробностями. Если данная личность особенно ценит остро отточенную мысль, то эта сторона ее существа может выделяться ярче других ее сторон и в большей степени определять ее духовный мир. Может тогда случиться, что в ретроспективном взгляде эта личность усмотрит систематическое саморазвитие там, где фактические переживания чередовались в калейдоскопическом беспорядке. В самом деле, многообразие внешних обстоятельств в соединении с тем, что в каждый данный момент думаешь только об одном, вводит в сознательную жизнь каждого человека своего рода атомистическую структуру. В развитии человека моего склада поворотная точка достигается тогда, когда главный интерес жизни понемногу отрывается от мгновенного и личного и все больше и больше концентрируется в

стремлении мысленно охватить природу вещей. С этой точки зрения приведенные выше схематические заметки содержат верного столько, сколько вообще может быть сказано в таких немногих словах.

Что значит, в сущности, «думать»? Когда при восприятии ощущений, идущих от органов чувств, в воображении всплывают картины воспоминания, то это еще не значит «думать». Когда эти картины становятся в ряд, каждый член которого пробуждает следующий, то и это еще не есть мышление. Но когда определенная картина встречается во многих таких рядах, то она, в силу своего повторения, начинает служить упорядочивающим элементом для таких рядов благодаря тому, что она связывает ряды, сами по себе лишенные связи. Такой элемент становится орудием, становится понятием. Мне кажется, что переход от свободных ассоциаций или «мечтаний» к мышлению характеризуется той, более или менее доминирующей, ролью, какую играет при этом «понятие». Само по себе не представляется необходимым, чтобы понятие соединилось с символом, действующим на органы чувств и воспроизводимым (со словом); но если это имеет место, то мысль может быть сообщена другому лицу.

По какому же праву, спросит теперь читатель, оперирует этот человек так бесцеремонно и кустарно с идеями в такой проблематической области, не делая притом ни малейшей попытки что-либо доказать? Мое оправдание: всякое наше мышление — того же рода; оно представляет собой свободную игру с понятиями. Обоснование этой игры заключается в достижимой при помощи нее возможности обозреть чувственные восприятия. Понятие «истины» к такому образованию еще совсем не применимо; это понятие может, по моему мнению, быть введено только тогда, когда имеется налицо условное соглашение относительно элементов и правил игры.

Для меня не подлежит сомнению, что наше мышление протекает в основном, минуя символы (слова), и к тому же бессознательно. Если бы это было иначе, то почему нам случается иногда «удивляться», притом совершенно спонтанно, тому или иному восприятию? Этот «акт удивления», по-видимому, наступает тогда, когда восприятие вступает в конфликт с достаточно установившимся в нас миром понятий. В тех случаях, когда такой конфликт переживается остро и интенсивно, он в свою очередь оказывает сильное влияние на наш умственный мир. Развитие этого умственного мира представляет собой в известном смысле преодоление чувства удивления — непрерывное бегство от «удивительного», от «чуда»*.

* Слова «чудо» и «удивление» имеют в немецком языке один и тот же корень «Wunder». — *Прим. перев.*

Чудо такого рода я испытал ребенком 4 или 5 лет, когда мой отец показал мне компас. То, что эта стрелка вела себя так определенно, никак не подходило к тому роду явлений, которые могли найти себе место в моем неосознанном мире понятий (действие через прикосновение). Я помню еще и сейчас — или мне кажется, что я помню, — что этот случай произвел на меня глубокое и длительное впечатление. За вещами должно быть что-то еще, глубоко скрытое. Человек так не реагирует на то, что он видит с малых лет. Ему не кажется удивительным падение тел, ветер и дождь, он не удивляется на луну и на то, что она не падает, не удивляется различию между живым и неживым.

В возрасте 12 лет я пережил еще одно чудо совсем другого рода: источником его была книжечка по евклидовой геометрии на плоскости, которая попала мне в руки в начале учебного года. Там были утверждения, например, о пересечении трех высот треугольника в одной точке, которые хотя и не были сами по себе очевидны, но могли быть доказаны с уверенностью, исключавшей как будто всякие сомнения. Эта ясность и уверенность произвели на меня неопишное впечатление. Меня не беспокоило то, что аксиомы должны быть приняты без доказательства. Вообще мне было вполне достаточно, если я мог в своих доказательствах опираться на такие положения, справедливость которых представлялась мне бесспорной. Я помню, например, что теорема Пифагора была мне показана моим дядей еще до того, как в мои руки попала священная книжечка по геометрии. С большим трудом мне удалось «доказать» эту теорему при помощи подобных треугольников; при этом мне казалось, однако, «очевидным», что отношение сторон прямоугольного треугольника должно полностью определяться одним из его острых углов. Вообще мне казалось, что доказывать нужно только то, что не «очевидно» в этом смысле. И предметы, с которыми имеет дело геометрия, не казались мне другой природы, чем «видимые и осязаемые» предметы, т. е. предметы, воспринимаемые органами чувств. Это примитивное понимание основано, конечно, на том, что бессознательно учитывалась связь между геометрическими понятиями и наблюдаемыми предметами (длина — твердый стержень и т. п.). Возможно, что это понимание лежит в основе известной кантовской постановки вопроса относительно возможности «синтетического суждения априори».

Хотя это выглядело так, будто путем чистого размышления можно получить достоверные сведения о наблюдаемых предметах, но такое «чудо» было основано на ошибке. Все же тому, кто испытывает это «чудо» в первый раз, кажется удивительным самый факт, что человек способен достигнуть такой степени надежности и чистоты в отвлеченном мышлении, какую нам впервые показали греки в геометрии.

Раз я позволил себе прервать начатый с грехом пополам некролог, я уже не буду стесняться выразить здесь в нескольких фразах свое гносеологическое кредо, хотя кое-что из этого было уже попутно сказано ранее. Эти мои убеждения складывались медленно и сложились много позднее; они не соответствуют тем установкам, которые у меня были, когда я был моложе.

Я вижу, с одной стороны, совокупность ощущений, идущих от органов чувств; с другой стороны, совокупность понятий и предложений, записанных в книгах. Связи понятий и предложений между собою — логического характера; задача логического мышления сводится исключительно к установлению соотношений между понятиями и предложениями по твердым правилам, которыми занимается логика. Понятия и предложения получают смысл, или «содержание», только благодаря их связи с ощущениями. Связь последних с первыми — чисто интуитивная и сама по себе не логической природы. Научная «истина» отличается от пустого фантазирования только степенью надежности, с которой можно провести эту связь или интуитивное сопоставление, и ничем иным. Система понятий есть творение человека, как и правила синтаксиса, определяющие ее структуру. Хотя системы понятий сами по себе логически совершенно произвольны, но их связывает то, что они, во-первых, должны допускать возможно надежное (интуитивное) и полное сопоставление с совокупностью ощущений; во-вторых, они должны стремиться обойтись наименьшим числом логически независимых элементов (основных понятий и аксиом), т. е. таких понятий, для которых не дается определений, и таких предложений, для которых не дается доказательств.

Предложение верно, если оно выведено внутри некоторой логической системы по принятым правилам. Содержание истины в системе определяется надежностью и полнотой ее соответствия с совокупностью ощущений. Вернее, предложение заимствует свою «истинность» из запаса истины, содержащегося в системе, его заключающей.

Замечание к историческому развитию. Юм ясно понял, что некоторые понятия, например понятие причинности, не могут быть выведены из опытных данных логическим путем. Кант, убежденный в том, что без некоторых понятий обойтись нельзя, считал эти понятия в их принятой форме необходимыми предпосылками всякого мышления и отличал их от понятий эмпирического происхождения. Я же уверен, что это разграничение ошибочно и не охватывает естественным образом задачу. Все понятия, даже и ближайшие к ощущениям и переживаниям, являются с логической точки зрения произвольными положениями, точно так же, как и понятие причинности, о котором в первую очередь шла речь.

Возвращаюсь теперь к некрологу. В возрасте 12—16 лет я ознакомился с элементами математики, включая основы дифференциального и интегрального исчисления. При этом на мое счастье мне попались книги, в которых обращалось не слишком много внимания на логическую строгость, зато хорошо была выделена везде главная мысль. Все это занятие было поистине увлекательно; в нем были взлеты, по силе впечатления не уступавшие «чуду» элементарной геометрии, — основная идея аналитической геометрии, бесконечные ряды, понятие дифференциала и интеграла. Мне посчастливилось также получить понятие о главнейших результатах и методах естественных наук по очень хорошему популярному изданию, в котором изложение почти везде ограничивалось качественной стороной вопроса (бернштейновские естественнонаучные книги для народа — труд в 5—6 томов); книги эти я читал, не переводя дыхания. К тому времени, когда я в возрасте 17 лет поступил в Цюрихский политехникум в качестве студента по физике и математике, я уже был немного знаком и с теоретической физикой.

Там у меня были прекрасные преподаватели (например, Гурвиц, Минковский), так что, собственно говоря, я мог бы получить солидное математическое образование. Я же большую часть времени работал в физической лаборатории, увлеченный непосредственным соприкосновением с опытом. Остальное время я использовал главным образом для того, чтобы дома изучать труды Кирхгофа, Гельмгольца, Герца и т. д. Причиной того, что я до некоторой степени пренебрегал математикой, было не только преобладание естественнонаучных интересов над интересами математическими, но и следующее своеобразное чувство. Я видел, что математика делится на множество специальных областей, и каждая из них может занять всю отпущенную нам короткую жизнь. И я увидел себя в положении буриданова осла, который не может решить, какую же ему взять охапку сена. Дело было, очевидно, в том, что моя интуиция в области математики была недостаточно сильна, чтобы уверенно отличить основное и важное от остальной учености, без которой еще можно обойтись. Кроме того, и интерес к исследованию природы, несомненно, был сильнее; мне как студенту не было еще ясно, что доступ к более глубоким принципиальным проблемам в физике требует тончайших математических методов. Это стало мне выясняться лишь постепенно, после многих лет самостоятельной научной работы. Конечно, и физика была разделена на специальные области, и каждая из них могла поглотить короткую трудовую жизнь, так и не удовлетворив жажды более глубокого познания. Огромное количество недостаточно увязанных эмпирически фактов действовало и здесь подавляюще. Но здесь я скоро научился выиски-

вать то, что может повести в глубину, и отбрасывать все остальное, все то, что перегружает ум и отвлекает от существенного. Тут была, однако, та загвоздка, что для экзамена нужно было напихивать в себя — хочешь не хочешь — всю эту премудрость. Такое принуждение настолько меня запугивало, что целый год после сдачи окончательного экзамена всякое размышление о научных проблемах было для меня отравлено. При этом я должен сказать, что мы в Швейцарии страдали от того принуждения, удушающего настоящую научную работу, значительно меньше, чем страдают студенты во многих других местах. Было всего два экзамена; в остальном можно было делать более или менее то, что хочешь. Особенно хорошо было тому, у кого, как у меня, был друг, аккуратно посещавший все лекции и добросовестно обрабатывавший их содержание. Это давало свободу в выборе занятия вплоть до нескольких месяцев перед экзаменом, свободу, которой я широко пользовался; связанную же с ней нечистую совесть я принимал как неизбежное, притом значительно меньшее, зло. В сущности, почти чудо, что современные методы обучения еще не совсем удушили святую любознательность, ибо это нежное растение требует наряду с поощрением прежде всего свободы — без нее оно неизбежно погибает. Большая ошибка думать, что чувство долга и принуждение могут способствовать находить радость в том, чтобы смотреть и искать. Мне кажется, что даже здоровое хищное животное потеряло бы жадность к еде, если бы удалось с помощью бича заставить его непрерывно есть, даже когда оно голодно, и особенно, если принудительно предлагаемая еда не им выбрана.

Обратимся теперь к физике, какой она представлялась в то время. Несмотря на то, что в отдельных областях она процветала, в принципиальных вещах господствовал догматический застой. В начале (если такое было) Бог создал ньютоновы законы движения вместе с необходимыми массами и силами. Этим все и исчерпывается; остальное должно получиться дедуктивным путем, в результате разработки надлежащих математических методов. Опираясь на эту основу и в особенности применяя уравнения в частных производных, XIX столетие дало так много, что это должно вызывать удивление всякого мыслящего человека. Ньютон, вероятно, первый продемонстрировал в своей теории распространения звука плодотворность метода дифференциальных уравнений в частных производных. Эйлер создал уже основы гидродинамики. Но более детальное построение механики дискретных масс как основы всей физики было достижением XIX века. На студента наибольшее впечатление производило не столько построение самого аппарата механики и решение сложных задач, сколько достижения механики в областях, на первый взгляд совсем с ней не связанных: механическая теория света, которая

рассматривала свет как волновое движение квазитвердого упругого эфира, и прежде всего кинетическая теория газов. Здесь следует упомянуть независимость теплоемкости одноатомных газов от атомного веса, вывод уравнения состояния газа и его связь с теплоемкостью, а главное — численную зависимость между вязкостью, теплопроводностью и диффузией газов, которая давала и абсолютные размеры атома. Эти результаты служили одновременно подтверждением механики как основы физики и подтверждением атомной гипотезы, которая тогда уже твердо укрепилась в химии. Однако в химии играли роль только отношения атомных масс, а не их абсолютные величины, поэтому там атомную теорию можно было рассматривать скорее как наглядную аналогию, а не как познание действительного строения материи. Независимо от этого, глубочайший интерес вызывало и то, что статистическая теория классической механики была в состоянии вывести основные законы термодинамики; по существу, это было сделано уже Больцманом.

Нельзя поэтому удивляться, что физики прошлого века видели в классической механике незыблемое основание для всей физики и даже для всего естествознания; они неустанно пытались обосновать на механике и максвелловскую теорию электромагнетизма, медленно пробивавшую себе дорогу. Максвелл и Герц в своем сознательном мышлении также считали механику надежной основой физики, хотя в исторической перспективе следует признать, что именно они и подорвали доверие к механике как основе основ всего физического мышления. Эрнст Мах в своей истории механики потряс эту догматическую веру; на меня — студента — эта книга оказала глубокое влияние именно в этом отношении. Я вижу действительное величие Маха в его неподкупном скепсисе и независимости; в мои молодые годы на меня произвела сильное впечатление также и гносеологическая установка Маха, которая сегодня представляется мне в существенных пунктах несостоятельной. А именно: он недостаточно подчеркнул конструктивный и спекулятивный характер всякого мышления, в особенности научного мышления. Вследствие этого он осудил теорию как раз в тех ее местах, где конструктивно-спекулятивный характер ее выступает неприкрыто, например в кинетической теории.

Прежде чем приняться за критику механики как основы физики, нужно сначала высказать несколько общих положений о точках зрения, или критериях, с которых вообще можно критиковать физические теории. Первый критерий очевиден: теория не должна противоречить данным опыта. Но насколько очевидным кажется это требование само по себе, настолько тонким оказывается его применение. Дело в том, что часто, если не всегда, можно сохранить данную общую теоретическую основу, если только приспособлять ее к фактам при помощи

более или менее искусственных дополнительных предположений. Во всяком случае, в этом первом критерии речь идет о проверке теоретической основы на имеющемся опытном материале.

Во втором критерии речь идет не об отношении к опытному материалу, а о предпосылках самой теории, о том, что можно было бы кратко, хотя и не вполне ясно, назвать «естественностью» или «логической простотой» предпосылок (основных понятий и основных соотношений между ними). Этот критерий, точная формулировка которого представляет большие трудности, всегда играл большую роль при выборе между теориями и при их оценке. Речь идет здесь не просто о каком-то перечислении логически независимых предпосылок (если таковое вообще возможно однозначным образом), а о своего рода взвешивании и сравнении несоизмеримых качеств. Далее, из двух теорий с одинаково «простыми» основными положениями следует предпочесть ту, которая сильнее ограничивает возможные априори качества систем (т. е. содержит наиболее определенные утверждения). Относительно «области применимости» теорий мне можно здесь не говорить ничего, поскольку мы рассматриваем только такие теории, предметом которых является вся совокупность физических явлений.

Второй критерий можно кратко характеризовать как критерий «внутреннего совершенства» теории, тогда как первый относится к ее «внешнему оправданию». К «внутреннему совершенству» теории я причисляю также и следующее: теория представляется нам более ценной тогда, когда она не является логически произвольным образом выбранной среди приблизительно равноценных и аналогично построенных теорий.

Недостаточную определенность моих утверждений в двух последних абзацах я не буду оправдывать недостатком отведенного мне в печати места; я прямо признаю, что так сразу я не могу, а, может быть, и вообще не в состоянии заменить эти намеки точными определениями. Однако я считаю, что более точная формулировка возможна. Во всяком случае, мы видим, что между «авгурами» большей частью наблюдается полное согласие в суждении о «внутреннем совершенстве» теорий и в особенности о степени их «внешнего оправдания».

Переходим теперь к критике механики как основы физики.

С точки зрения первого критерия (проверка на опыте) включение волновой оптики в механическую картину мира должно было вызывать серьезные сомнения. Если считать, что свет должен рассматриваться как волновое движение в упругом теле (в эфире), то это тело должно быть всепроникающей средой. В силу поперечности световых волн среда эта должна быть в основном подобна твердому телу, однако она должна быть несжимаемой, чтобы продольные волны не сущес-

твовали. Этот эфир должен был вести рядом с обычной материей призрачное существование, поскольку он как будто не оказывал никакого сопротивления движению «весомых» тел. Чтобы объяснить показатели преломления прозрачных тел, а также процессы испускания и поглощения света, пришлось бы принять путаные взаимодействия между двумя родами материи; это не только не было выполнено, но даже никто этого серьезно и не пробовал.

Далее, электромагнитные силы заставили ввести электрические массы, которые, хотя и не обладали заметной инертностью, оказывали друг на друга воздействие; в отличие от силы тяготения это взаимодействие имело полярный характер.

Причиной, в конце концов побудившей физиков отказаться после долгих колебаний от веры в возможность построить всю физику на основе ньютоновой механики, была электродинамика Фарадея—Максвелла. Эта теория вместе с опытами Герца, ее подтвердившими, показала, что существуют электромагнитные процессы, по существу своему оторванные от всякой весомой материи, а именно волны, представляющие собой колебания электромагнитных «полей» в пустом пространстве. Кто хотел сохранить механику как основу физики, тот должен был дать механическое толкование уравнениям Максвелла. Над этим и стали трудиться усерднейшим образом, но совершенно бесплодно, тогда как самые уравнения во все большей степени выявляли свою плодотворность. Люди привыкли оперировать с этими полями как с самостоятельными реальностями, не вдаваясь в их механическую природу. Так почти незаметно взгляд на механику как на основу физики был оставлен; это произошло потому, что приспособление механики к опытным фактам оказалось безнадежным. С тех пор существуют две системы элементарных понятий: с одной стороны, взаимодействующие на расстоянии материальные точки, а с другой — непрерывное поле. Это состояние физики, в котором отсутствует единая ее основа, является как бы переходным; при всей его неудовлетворительности оно далеко еще не преодолено...

Теперь о критике механики как основы физики с точки зрения второго, «внутреннего», критерия. При современном состоянии науки, когда механический фундамент уже оставлен, такого рода критика может иметь лишь методический интерес. Однако она весьма пригодна в качестве примера такой аргументации, которая в будущем должна при выборе между теориями играть тем большую роль, чем дальше отстоят их основные понятия и аксиомы от непосредственно наблюдаемого; при таких обстоятельствах сопоставление выводов теории с опытом становится все сложнее и затруднительнее. Здесь следует в первую очередь упомянуть одно соображение Маха, которое, впрочем, было совершенно ясно уже и

Ньютону («опыт с ведром»). С точки зрения чисто геометрического описания, все «жесткие» системы отсчета являются в логическом отношении равноправными. Однако уравнения механики (и уже первый закон Ньютона) справедливы лишь в некоторых из этих систем отсчета, а именно в «инерциальных» системах, составляющих особый класс. При этом характер системы отсчета как материального тела оказывается несущественным. Необходимость брать именно инерциальную систему отсчета должна быть поэтому обусловлена чем-то лежащим вне тех предметов (масс, расстояний), о которых идет речь в теории. В качестве такого определяющего обстоятельства Ньютон ввел «абсолютное пространство» как некоего вездесущего активного участника всех механических процессов. Под «абсолютным» Ньютон, очевидно, понимает «не подверженное влиянию масс и их движений». Положение усугубляется тем, что предполагается существование бесконечного множества инерционных систем, движущихся друг относительно друга равномерно и без вращения, причем эти системы отсчета предполагаются выделенными среди всех остальных жестких систем отсчета.

По мнению Маха, в действительно рациональной теории инертность должна, подобно другим ньютоновским силам, происходить от взаимодействия масс. Это мнение я долгое время считал в принципе правильным. Оно неявным образом предполагает, однако, что теория, на которой все основано, должна принадлежать тому же общему типу, как и ньютонова механика: основными понятиями в ней должны служить массы и взаимодействия между ними. Между тем нетрудно видеть, что такая попытка решения не вяжется с духом теории поля.

Тем не менее, маховская критика сама по себе вполне обоснована. Это особенно ясно видно из следующей аналогии. Представим себе людей, строящих механику; пусть при этом они знают только небольшую часть земной поверхности и не имеют возможности видеть звезды. Они будут склонны приписывать вертикальному измерению пространства (направление ускорения при падении) особые физические свойства. На этом основании они придут к заключению, что поверхность земли преимущественно горизонтальна. Положим, что они не поддаются соображению, что пространство в геометрическом отношении изотропно, и что поэтому нельзя строить основные физические законы так, чтобы из них следовало наличие привилегированного направления; эти люди, вероятно, будут склонны утверждать (подобно Ньютону), что вертикаль абсолютна, что это показывает опыт, и с этим приходится считаться. Выделение вертикалей перед всеми другими направлениями совершенно аналогично выделению инерциальных систем перед другими жесткими координатными системами.

Приведем теперь дальнейшие аргументы, которые тоже относятся к вопросу о внутренней простоте и естественности механики. Если принять без критических сомнений понятия пространства (включая геометрию) и времени, то еще нет оснований возражать против введения сил дальнего действия в качестве исходных понятий, хотя понятие дальнего действия и не согласуется с теми идеями, которые люди себе вырабатывают на основании грубого повседневного опыта. Зато имеется другое соображение, благодаря которому понимание механики как основы физики представляется нам примитивным.

В основном имеются два закона.

1) Закон движения.

2) Выражение для силы (или для потенциальной энергии).

Закон движения точен, но он бессодержателен, пока не дано выражение для силы. Написание этого выражения связано, однако, с широким произволом, особенно если отбросить неочевидное само по себе требование, чтобы силы зависели только от самих координат (a , например, не от их производных по времени).

В рамках такой теории произвольным является и то, что действие сил тяготения (и электрических сил), выходящих из одной точки, определяется потенциальной функцией ($1/r$). Дополнительное замечание: уже давно известно, что эта функция является центрально-симметрическим решением простейшего (инвариантного по отношению к вращениям) дифференциального уравнения $\Delta\phi = 0$; было бы естественным считать это признаком того, что эта функция должна определяться из некоторого пространственного закона, чем устранялся бы произвол в выборе закона для сил. Собственно говоря, это первый результат, который мог бы навести на мысль об отходе от теории дальнего действия. Однако развитие в этом направлении, начатое Фарадеем, Максвеллом и Герцем, наступило лишь позже, под давлением опытных фактов.

Мне бы хотелось также указать на внутреннюю несимметрию теории, проявляющуюся в том обстоятельстве, что входящая в закон движения инертная масса входит и в выражение для сил тяготения, но не в выражения для других сил. Наконец, я бы хотел указать на то, что разделение энергии на две существенно различные части — кинетическую и потенциальную энергию — должно восприниматься как нечто неестественное; Герц счел это таким неудобством, что в своей последней работе даже попытался освободить механику от понятия потенциальной энергии (т. е. силы)...

Довольно об этом. Прости меня, Ньютон; ты нашел единственный путь, возможный в твое время для человека величайшей научной творческой способности и силы мысли. Понятия, созданные тобой, и

сейчас еще остаются ведущими в нашем физическом мышлении, хотя мы теперь и знаем, что если мы будем стремиться к более глубокому пониманию взаимосвязей, то мы должны будем заменить эти понятия другими, стоящими дальше от сферы непосредственного опыта.

«И это некролог?» — может спросить удивленный читатель. По сути дела — да, хотелось бы мне ответить. Потому что главное в жизни человека моего склада заключается в том, *что* он думает и *как* он думает, а не в том, что он делает или испытывает. Значит, в некрологе можно в основном ограничиться сообщением тех мыслей, которые играли значительную роль в моих стремлениях. Теория производит тем большее впечатление, чем проще ее предпосылки, чем разнообразнее предметы, которые она связывает, и чем шире область ее применения. Отсюда глубокое впечатление, которое произвела на меня классическая термодинамика. Это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убежден, что в рамках применимости ее основных понятий она никогда не будет опровергнута (к особому сведению принципиальных скептиков).

Самым увлекательным предметом во времена моего учения была теория Максвелла. Переход от сил дальнего действия к полям как основным величинам делал эту теорию революционной. То, что оптика нашла себе место в теории электромагнетизма, установившей связь между скоростью света и абсолютной электрической и магнитной системой мер, а также связавшей коэффициент преломления с диэлектрической постоянной и приведшей к качественному соотношению между коэффициентом отражения и металлической проводимостью тела, — все это было для меня, как откровение. Помимо перехода к теории поля, т. е. к выражению элементарных законов при помощи дифференциальных уравнений, Максвеллу понадобился всего один гипотетический шаг — введение электрического тока смещения в пустоте и в диэлектриках с его магнитным действием; это нововведение было почти что продиктовано свойствами самих дифференциальных уравнений. В этой связи я не могу удержаться, чтобы не отметить удивительное внутреннее сходство между сочетанием Фарадей — Максвелл и сочетанием Галилей — Ньютон. Первый в каждой паре интуитивно схватывал соотношения, а второй их точно формулировал и применял количественно.

Проникновение в сущность электромагнитной теории затруднялось в те времена следующим своеобразным обстоятельством. Электрические и магнитные «силы поля» рассматривались наравне со «смещениями» как первичные величины, а пустое пространство считалось частным случаем диэлектрика.носителем поля считалась *материя* (вещество), а не *пространство*. А это подразумевало, что носитель поля обладает свой-

ством иметь скорость, что, конечно, должно было быть справедливым и для «пустоты» (эфир). Электродинамика движущихся тел Герца всецело основана на этой принципиальной установке.

Большой заслугой Г.А. Лоренца было то, что он произвел здесь переворот, притом самым убедительным образом. Согласно Лоренцу, принципиально существует только поле в пустоте. Вещество, которое предполагается атомистичным, является единственным носителем зарядов; между материальными частицами находится пустое пространство — носитель электромагнитного поля, которое создается положением и скоростью точечных зарядов, сидящих на частицах. Диэлектрические свойства, проводимость и т. п., обусловлены исключительно характером механических связей между частицами, из которых состоят тела. Частицы-заряды создают поле, которое в свою очередь действует на заряды частиц. Соответствующие силы обуславливают движение частиц согласно законам Ньютона. Если сравнить это с системой Ньютона, то изменение заключается в следующем: силы дальнего действия заменяются полем, описывающим также и излучение. Тяготение большей частью в расчет не принимается вследствие его относительной малости; однако оно может быть учтено путем обогащения структуры поля и соответственного расширения максвелловских уравнений поля. Физик нынешнего поколения сочтет точку зрения Лоренца единственно возможной, а в то время это был поразительно смелый шаг, без которого дальнейшее развитие было бы невозможно.

Если посмотреть на эту фазу развития теории критически, то прежде всего бросается в глаза ее двойственность, состоящая в том, что материальная точка, в ньютоновом смысле, и поле как континуум употребляются рядом в качестве элементарных понятий. Кинетическая энергия и энергия поля представляются как принципиально разные вещи. Это кажется тем более неудовлетворительным, что согласно теории Максвелла магнитное поле движущегося электрического заряда представляло инерцию. Почему же не *всю* инерцию? Тогда имела бы только энергия поля, и частица была бы лишь областью особенно большой плотности этой энергии поля. Тогда можно было бы надеяться, что понятие материальной точки вместе с уравнениями движения частицы может быть выведено из уравнений поля — и мешающая двойственность была бы устранена.

Г.А. Лоренц это прекрасно понимал. Но уравнения Максвелла не позволяли установить условия равновесия электричества, составляющего одну частицу. Только другие нелинейные уравнения поля могли бы, может быть, это сделать. Однако еще не было метода, который бы позволил находить такие уравнения, не вдаваясь в самый авантюрный произвол. Во всяком случае, можно было надеяться найти новую,

надежную основу для всей физики, продвигаясь шаг за шагом по пути, столь успешно намеченному Фарадеем и Максвеллом.

Таким образом, революцию, начатую введением поля, никак нельзя было считать оконченной. Случилось так, что на пороге двух веков независимо от этого переворота разразился еще один кризис основных понятий, важность которого внезапно дошла до сознания людей благодаря исследованиям Макса Планка о тепловом излучении (1900). История этого кризиса тем более замечательна, что на нее, по крайней мере в ее начальной стадии, не влияли никакие из ряда вон выходящие открытия экспериментального характера.

На основе термодинамических соображений Кирхгоф пришел к выводу, что плотность энергии и спектральный состав излучения, заключенного в полость с непрозрачными стенками температуры T , не зависит от природы этих стенок. Это означало, что плотность ρ монохроматического излучения есть универсальная функция частоты ν и абсолютной температуры T . Таким образом, возникала интересная задача определения этой функции $\rho(\nu, T)$. Что можно было получить теоретическим путем относительно этой функции? Согласно теории Максвелла излучение должно оказывать на стенки давление, определяемое полной плотностью энергии. Отсюда Больцман вывел чисто термодинамическим путем, что общая плотность энергии излучения ($\int \rho d\nu$) пропорциональна T^4 . Тем самым он нашел теоретическое обоснование для эмпирической закономерности, найденной уже ранее Стефаном, или, иначе говоря, он связал ее с основами теории Максвелла. После этого В. Вин при помощи остроумного термодинамического рассуждения, в котором также использовалась теория Максвелла, нашел, что универсальная функция ρ от двух переменных ν и T должна иметь вид

$$\rho \approx \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right),$$

где $f(\nu / T)$ означает универсальную функцию единственной переменной ν / T . Было ясно, что теоретическое определение этой универсальной функции f имеет фундаментальное значение — это и была та задача, которая стояла перед Планком. Тщательные измерения привели к довольно точному эмпирическому определению функции f . Сначала Планку удалось, опираясь на эти эмпирические измерения, найти для этой функции представление, довольно хорошо их передававшее, а именно:

$$\rho = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1},$$

где h и k — две универсальные постоянные; первая из них привела к теории квантов. Эта формула выглядит благодаря своему знаменателю несколько странно. Допускает ли она теоретическое обоснование? Планк действительно нашел обоснование, несовершенства которого вначале были скрыты; это последнее обстоятельство было настоящим счастьем для развития физики. Если эта формула верна, то она позволяет с помощью теории Максвелла вычислить среднюю энергию E квазимонохроматического осциллятора, находящегося в поле излучения,

$$E = \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}.$$

Планк предпочел попробовать теоретически вычислить эту последнюю величину. В этой попытке термодинамика уже не помогала, точно так же, как не помогала и теория Максвелла. Но одно свойство этой формулы сильно обнадеживало. А именно: для высоких значений температуры (при постоянном ν) формула давала выражение

$$E = kT.$$

Это — то же самое выражение, какое дает кинетическая теория газов для средней энергии материальной точки, способной совершать упругие колебания в одном измерении. Кинетическая теория дает

$$E = \frac{R}{N}T,$$

где R — газовая постоянная, а N — число молекул в грамм-молекуле; эта постоянная связана с абсолютной величиной атома. Если приравнять оба выражения, то получим

$$N = \frac{R}{k}.$$

Значит, одна из постоянных формулы Планка в точности дает истинную величину атома. Численное значение удовлетворительно совпало с определениями N , правда, не очень точными, сделанными на основе кинетической теории газов.

Это было большим успехом, что ясно сознавал Планк. Однако тут имеется и обратная сторона, довольно неприятная, которую, к счастью, Планк сразу не заметил. А именно: рассуждение требует, чтобы соотношение $E = kT$ было справедливо и для малых температур. Но тогда пропала бы и формула Планка, и ее постоянная h . Правильный вывод из существующей теории был бы, следовательно, такой: или

средняя кинетическая энергия осциллятора получается неверно из теории газов, что означало бы опровержение механики; или же средняя энергия осциллятора получается неверно из теории Максвелла, что означало бы опровержение этой последней. При этих обстоятельствах самым вероятным является то, что обе теории верны только в пределе, а в остальном неверны; так это и есть на самом деле, как мы увидим в дальнейшем. Если бы Планк пришел к этому выводу, то он, может быть, не сделал бы своего великого открытия, потому что в его рассуждениях исчезло бы самое основание.

Вернемся к рассуждению Планка. На основании кинетической теории газов Больцман нашел, что энтропия равна, с точностью до постоянного множителя, логарифму «вероятности» рассматриваемого состояния. Этим он выяснил сущность процессов, «необратимых» в смысле термодинамики. Напротив того, с молекулярно-механической точки зрения все процессы обратимы. Если назвать состояние, определенное в смысле молекулярной теории, состоянием микроскопическим или, короче, микросостоянием, а состояние, описанное термодинамически, — макросостоянием, то к каждому макроскопическому состоянию будет относиться великое множество (Z) микросостояний. Тогда Z является мерой вероятности данного макросостояния. Эта мысль представляется крайне важной еще и потому, что применимость ее не ограничивается микроскопическим описанием на основе механики. Это заметил Планк и применил принцип Больцмана к системе, состоящей из очень большого числа резонаторов с одинаковой частотой ν . Макроскопическое состояние задано полной энергией колебания всех резонаторов; макросостояние задано, если дана (для данного момента) энергия каждого отдельного резонатора. Для того чтобы число микросостояний, относящихся к одному макросостоянию, получилось конечным, Планк разделил полную энергию на большое, но конечное число одинаковых элементов энергии ϵ и задал вопрос: сколькими способами можно распределить между резонаторами эти элементы энергии? Логарифм этого числа дает тогда энтропию, а с нею (термодинамическим путем) и температуру системы. Планк получил свою формулу, взяв для элементов энергии ϵ величину $\epsilon = h\nu$. Решающим является здесь то обстоятельство, что результат получается только, если брать для ϵ определенное конечное значение и, значит, не переходить к пределу $\epsilon = 0$. Такая форма рассуждения затушевывает то, что оно противоречит механической и электродинамической основе, на которую опирается вывод во всем остальном. В действительности, однако, в этом выводе неявно предполагается, что отдельные резонаторы могут поглощать и испускать энергию только «квантами» величины $h\nu$. Это означает, что энергия механической

колебательной системы, так же как и энергия излучения, может передаваться только такими квантами — наперекор законам механики и электродинамики. Здесь противоречие с динамикой было фундаментальным, тогда как противоречие с электродинамикой могло быть и не таким глубоким. А именно, выражение для плотности энергии излучения является *совместным* с уравнениями Максвелла, но оно не является необходимым следствием этих уравнений. Что это выражение правильно дает важные средние значения, явствует хотя бы из того, что основанные на нем законы Стефана—Больцмана и Вина согласуются с опытом.

Все это стало мне ясно уже вскоре после появления основной работы Планка, так что я, хотя и не имел замены для классической механики, все-таки мог видеть, к каким следствиям ведет этот закон теплового излучения как для фотоэлектрического эффекта и других родственных ему явлений, связанных с превращениями лучистой энергии, так и для теплоемкости тел, в частности твердых тел. Но все мои попытки приспособить теоретические основы физики к этим результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля, и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главнейшие законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это кажется мне чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли.

Мои личные интересы в эти годы были направлены не столько на отдельные следствия из результатов Планка, как бы важны они ни были; главным моим вопросом был следующий. Какие общие выводы позволяет сделать формула излучения относительно структуры излучения и вообще относительно электромагнитной основы физики? Прежде чем говорить об этом подробнее, я должен коротко упомянуть о некоторых исследованиях, относящихся к броуновскому движению и родственным ему предметам (явления флуктуации) и основанных главным образом на классической кинетической теории. Не будучи знакомым с появившимися ранее исследованиями Больцмана и Гиббса, которые по существу исчерпывают вопрос, я развил статистическую механику и основанную на ней молекулярно-кинетическую теорию термодинамики. При этом главной моей целью было найти такие факты, которые возможно надежнее устанавливали бы существование атомов определенной конечной величины.

Не зная, что наблюдения над «броуновским движением» давно известны, я открыл, что атомистическая теория приводит к существованию

доступного наблюдению движения взвешенных микроскопических частиц. Наиболее простой вывод основывался на следующих соображениях. Если молекулярно-кинетическая теория в принципе верна, то суспензия видимых частиц должна, подобно раствору молекул, обладать осмотическим давлением, подчиняющимся газовым законам. Это осмотическое давление зависит от истинных размеров молекул, т. е. от числа молекул в грамм-эквиваленте. Если плотность суспензии неравномерна, то имеющееся в силу этого пространственное непостоянство осмотического давления вызывает выравнивающее диффузионное движение, которое можно вычислить из известной подвижности частиц. С другой стороны, тот же диффузионный процесс можно рассматривать как результат беспорядочных смещений взвешенных частиц под действием теплового движения, причем величина смещений наперед неизвестна. Приравнивая значения диффузионного потока, полученные обоими путями, приходим к количественному выражению статистического закона для этих перемещений, т. е. к закону броуновского движения. Согласие этих выводов с опытом, а также сделанное Планком определение истинной величины молекулы из закона излучения (для высоких температур) убедило многочисленных тогда скептиков (Оствальд, Мах) в реальности атомов. Предубеждение этих ученых против атомистической теории можно несомненно отнести за счет их позитивистской философской установки. Это — интересный пример того, как философские предубеждения мешают правильной интерпретации фактов даже ученым со смелым мышлением и тонкой интуицией. Предрассудок, который сохранился и до сих пор, заключается в убеждении, будто факты сами по себе, без свободного теоретического построения, могут и должны привести к научному познанию. Такой самообман возможен только потому, что нелегко осознать, что и те понятия, которые благодаря проверке и длительному употреблению кажутся непосредственно связанными с эмпирическим материалом, на самом деле свободно выбраны.

Успех теории броуновского движения снова ясно показал, что классическая механика неизменно дает надежные результаты тогда, когда ее применяют к движениям, для которых можно пренебречь высшими производными от скорости по времени. На признании этого факта можно построить сравнительно простой метод, позволяющий кое-что узнать из формулы Планка о структуре излучения. А именно можно заключить следующее. Свободно двигающееся (перпендикулярно к своей плоскости) зеркало, отражающее квазимонохроматически, должно совершать в пространстве, наполненном излучением, нечто вроде броуновского движения со средней кинетической энергией, равной $\frac{1}{2}(R/N)T$ (R есть константа уравнения состояния для одной грамм-молекулы, N — число молекул в грамм-молекуле, T —

абсолютная температура). Если бы излучение не испытывало локальных флуктуации, то зеркало постепенно остановилось бы, так как благодаря его движению от его передней стороны отражается больше излучения, чем от задней. Но зеркало должно подвергаться действию флуктуации испытываемого им давления в силу того, что волновые пучки, составляющие излучение, интерферируют между собой; эти флуктуации могут быть вычислены из теории Максвелла. Такое вычисление показывает, однако, что этих флуктуаций давления недостаточно (особенно при малых плотностях излучения) для того, чтобы сообщить зеркалу среднюю кинетическую энергию $\frac{1}{2}(R/N)T$. Чтобы получить такое значение энергии, нужно принять, что существуют флуктуации давления другого рода, не вытекающие из теории Максвелла. Эти флуктуации соответствуют предположению, что энергия излучения состоит из неделимых квантов энергии $h\nu$ (с импульсами $h\nu/c$, где c — скорость света), обладающих точечной локализацией, причем эти кванты отражаются целиком, не раздробляясь. Приведенное рассуждение показало самым наглядным и прямым образом, что планковым квантам приходится приписывать своего рода непосредственную реальность; следовательно, в отношении энергии излучение должно обладать своего рода молекулярной структурой, что, конечно, противоречит теории Максвелла. Применяя к излучению другие рассуждения, основанные непосредственно на больцмановом соотношении между вероятностью и энтропией (причем вероятность приравнивается статистической частоте во времени), можно прийти к тому же результату. Эта двойственная природа излучения (и материальных частиц) является фундаментальным свойством реальности, которое квантовая механика истолковала остроумным и поразительно успешным образом. Почти все современные физики считают это толкование в основном окончательным, мне же оно кажется лишь временным выходом; несколько замечаний об этом следует дальше.

Благодаря такого рода рассуждениям уже вскоре после 1900 года, т. е. вскоре после основополагающей работы Планка, мне стало ясно, что ни механика, ни термодинамика не могут претендовать на полную точность (за исключением предельных случаев). Постепенно я стал отчаиваться в возможности докопаться до истинных законов путем конструктивных обобщений известных фактов. Чем дольше и отчаяннее я старался, тем больше я приходил к заключению, что только открытие общего формального принципа может привести нас к надежным результатам. Образцом представлялась мне термодинамика. Там общий принцип был дан в предложении: законы природы таковы, что построить вечный двигатель (первого и второго рода) невозможно. Но как же найти общий принцип, подобный этому? Такой принцип я

получил после десяти лет размышлений из парадокса, на который я натолкнулся уже в 16 лет. Парадокс заключается в следующем. Если бы я стал двигаться вслед за лучом света со скоростью c (скорость света в пустоте), то я должен был бы воспринимать такой луч света как покоящееся, переменное в пространстве электромагнитное поле. Но ничего подобного не существует; это видно как на основании опыта, так и из уравнений Максвелла. Интуитивно мне казалось ясным с самого начала, что с точки зрения такого наблюдателя все должно совершаться по тем же законам, как и для наблюдателя, неподвижного относительно Земли. В самом деле, как же первый наблюдатель может знать или установить, что он находится в состоянии быстрого равномерного движения?

Можно видеть, что в этом парадоксе уже содержится зародыш специальной теории относительности. Сейчас, конечно, всякий знает, что все попытки удовлетворительно разъяснить этот парадокс были обречены на неудачу до тех пор, пока аксиома об абсолютном характере времени и одновременности оставалась укоренившейся, хотя и неосознанной в нашем мышлении. Установить наличие этой аксиомы и признать ее произвольность в сущности уже означает решить проблему. Критическому мышлению, необходимому для того, чтобы нащупать эту центральную точку, сильно способствовало, в частности, чтение философских трудов Давида Юма и Эрнста Маха.

Необходимо было составить себе ясное представление о том, что означают в физике пространственные координаты и время некоторого события. Физическое толкование пространственных координат предполагало наличие жесткого тела отсчета (система отсчета), которое, к тому же, должно находиться в более или менее определенном состоянии движения (инерциальная система). При заданной инерциальной системе координаты означали результаты определенных измерений жесткими (неподвижными) стержнями. (Следует постоянно иметь в виду, что предположение о том, что жесткие стержни в принципе существуют, естественно напрашивается из повседневного опыта, но по существу является произвольным.) При таком толковании пространственных координат вопрос о справедливости евклидовой геометрии становится проблемой физической.

Для того чтобы аналогично толковать время некоторого события, необходимо средство для измерения промежутков времени (таким является идущий детерминированным образом периодический процесс, осуществляемый системой достаточно малых пространственных размеров). Часы, закрепленные неподвижно относительно инерциальной системы, определяют местное время. Совокупность местных времен всех пространственных точек со-

ставляет «время», относящееся к выбранной инерциальной системе, если, кроме того, дан способ «сверить» все эти часы между собой. Очевидно, что априори совсем не обязательно, чтобы определенные таким образом «времена» различных инерциальных систем совпадали между собой. Несовпадение давно было бы замечено, если бы свет не казался (благодаря большой величине c) средством для установления абсолютной одновременности — по крайней мере в практике повседневного опыта.

Предположения о (принципиальном) существовании (идеальных или совершенных) масштабов и часов не независимы друг от друга. В самом деле, если считать, что предположение о постоянстве скорости света в пустоте не приводит к противоречиям, то световой сигнал, отражающийся туда и обратно от зеркал на концах твердого стержня, представляет собой идеальные часы.

Упомянутый выше парадокс можно формулировать так. Согласно употребляемым в классической физике правилам преобразования пространственных координат и времени событий при переходе от одной инерциальной системы к другой следующие ниже два положения: 1) постоянство скорости света, 2) независимость законов (значит, в частности, и закона постоянства скорости света) от выбора инерциальной системы (специальный принцип относительности) — несовместны между собой (хотя каждое в отдельности подтверждается опытом).

В основе специальной теории относительности лежит признание того, что положения 1) и 2) между собой совместны, если для пересчета координат и времен событий применять правила преобразования нового рода («преобразование Лоренца»). При данном физическом толковании координат и времени это утверждение означает не просто условный шаг, но включает в себе определенные гипотезы о действительном поведении движущихся масштабов и часов — гипотезы, которые могут быть подтверждены или же опровергнуты на опыте.

Общий принцип специальной теории относительности содержится в постулате: законы физики инвариантны относительно преобразований Лоренца (дающих переход от одной инерциальной системы к любой другой инерциальной системе). Это есть ограничительный принцип для законов природы, который можно сравнить с лежащим в основе термодинамики ограничительным принципом несуществования вечного двигателя.

Скажем сперва несколько слов об отношении теории к «четырёхмерному пространству». Весьма распространенной ошибкой является мнение, будто специальная теория относительности как бы

открыла, или же вновь ввела, четырехмерность физического многообразия (континуума). Конечно, это не так. Четырехмерное многообразие пространства и времени лежит в основе также и классической механики. Только в четырехмерном континууме классической физики «сечения», соответствующие постоянному значению времени, обладают абсолютной (т. е. не зависящей от выбора системы отсчета) реальностью. Тем самым четырехмерный континуум естественно распадается на трехмерный и на одномерный (время), так что четырехмерное рассмотрение не навязывается как *необходимое*. Специальная же теория относительности, наоборот, создает формальную зависимость между тем, как должны входить в законы природы пространственные координаты, с одной стороны, и временная координата — с другой.

Важный вклад Минковского в теорию состоит в следующем. До исследования Минковского для проверки инвариантности физического закона приходилось выполнять над ним преобразование Лоренца до конца. Минковскому же удалось ввести такой аппарат, что сама математическая форма закона уже обеспечивает его инвариантность относительно преобразований Лоренца. Создав четырехмерное тензорное исчисление, Минковский дал для четырехмерного пространства то, что дает обыкновенное векторное исчисление для трех пространственных измерений. Он также показал, что преобразование Лоренца является не чем иным как поворотом координатной системы в четырехмерном пространстве (если не считать отличия в знаке, обусловленного особым характером времени).

Сделаем теперь критическое замечание о теории в том виде, как она охарактеризована выше. Можно заметить, что теория вводит (помимо четырехмерного пространства) два рода физических предметов, а именно: 1) масштабы и часы, 2) все остальное, например электромагнитное поле, материальную точку и т. д. Это в известном смысле нелогично; собственно говоря, теорию масштабов и часов следовало бы выводить из решений основных уравнений (учитывая, что эти предметы имеют атомную структуру и движутся), а не считать ее независимой от них. Обычный образ действия имеет, однако, свое оправдание, поскольку с самого начала ясна недостаточность принятых постулатов для обоснования теории масштабов и часов. Эти постулаты не настолько сильны, чтобы из них можно было вывести достаточно полные уравнения для физических процессов. Если вообще не отказываться от физического толкования координат (что само по себе было бы возможно), то лучше уж допустить такую непоследовательность, но с обязательством избавиться от нее на дальнейшей стадии развития теории. Однако этот грех нельзя узаконивать до такой степени, чтобы

разрешать, например, пользоваться представлением о расстоянии как о физической сущности особого рода, существенно отличной от других физических величин (сводить физику к геометрии и т. п.).

Выясним теперь, каковы те окончательно установленные истины, которыми физика обязана специальной теории относительности.

1) Одновременности отдаленных событий не существует; значит, нет и непосредственного дальнего действия в смысле ньютоновой механики. Правда, по этой теории можно было бы ввести дальнего действия, распространяющиеся со скоростью света, но это было бы совершенно искусственным; дело в том, что в теории такого рода не может быть разумного выражения для принципа энергии. Представляется поэтому неизбежным описывать физическую реальность непрерывными функциями точки в пространстве. В силу этого материальная точка уже не может считаться основным понятием теории.

2) Закон сохранения импульса и закон сохранения энергии сливаются в один-единственный закон. Инертная масса замкнутой системы тождественна с ее энергией, так что масса перестает быть самостоятельным понятием.

Замечание. Скорость света c является одной из величин, входящих в физические уравнения в качестве «универсальной постоянной». Однако если взять за единицу времени вместо секунды то время, за которое свет проходит 1 см, то c больше не будет входить в уравнения. В этом смысле можно сказать, что постоянная c является лишь кажущейся универсальной постоянной.

Общеизвестно и всеми принято, что, кроме того, можно исключить из физики другие универсальные постоянные, если вместо грамма и сантиметра ввести подходящие «естественные» единицы (например, массу и радиус электрона).

Если представить себе это выполненным, то в основные уравнения физики будут входить только лишь «безразмерные» постоянные. Относительно этих последних мне бы хотелось высказать одно предложение, которое нельзя обосновать пока ни на чем другом, кроме веры в простоту и понятность природы. Предложение это следующее: таких произвольных постоянных не существует. Иначе говоря, природа устроена так, что ее законы в большой мере определяются уже чисто логическими требованиями настолько, что в выражения этих законов входят только постоянные, допускающие теоретическое определение (т. е. такие постоянные, что их численных значений нельзя менять, не разрушая теории).

Специальная теория относительности обязана своим возникновением уравнениям Максвелла для электромагнитного поля. И обратно, только специальная теория относительности дает уравнениям Мак-

светла удовлетворительное формальное толкование. Уравнения Максвелла представляют собой простейшие инвариантные относительно преобразования Лоренца уравнения поля, которые только можно написать для кососимметричного тензора, связанного с векторным полем. Все это было бы хорошо, если бы мы не знали из квантовых явлений, что теория Максвелла не передает энергетических свойств излучения. Но для решения вопроса о том, как именно следует видоизменить теорию Максвелла (причем видоизменение должно быть естественным), специальная теория относительности не дает достаточных указаний. И на вопрос Маха «почему инерциальные системы физически выделены относительно других систем отсчета?» эта теория тоже не дает ответа.

Тот факт, что специальная теория относительности представляет лишь первый шаг в необходимом развитии, стал мне ясен лишь при попытке представить в рамках этой теории и тяготение. В классической механике, истолкованной в духе теории поля, потенциал тяготения представляется как *скалярное* поле (простейшая теоретическая возможность поля с одной-единственной составляющей). Такая скалярная теория тяготения может быть легко сделана инвариантной по отношению к группе преобразований Лоренца. Итак, естественной представляется следующая программа: полное физическое поле состоит из скалярного поля (тяготение) и векторного поля (электромагнитное поле); дальнейшие открытия могли бы заставить ввести еще более сложные поля, но пока об этом можно было бы не беспокоиться.

Возможность реализации этой программы представлялась, однако, сомнительной с самого начала. Дело в том, что теория должна была соединять в себе следующие вещи:

1) из общих соображений частной теории относительности было ясно, что *инертная* масса физической системы при увеличении полной энергии (в частности, при увеличении кинетической энергии) должна возрастать;

2) из очень точных опытов (в особенности из опытов Этвеша с крутильными весами) было эмпирически известно с очень большой точностью, что *тяжелая* масса тела в точности равна его *инертной* массе.

Из (1) и (2) следовало, что вес системы зависит вполне определенным и известным образом от ее полной энергии. Если теория этого не давала или давала только с натяжкой, то ее надо было отбросить. Проще всего это условие можно выразить так: при падении системы в данном поле силы тяжести ускорение не зависит от природы падающей системы (а значит, в частности, и от содержащейся в ней энергии).

Однако выяснилось, что в рамках намеченной программы это элементарное положение вещей вообще не может быть учтено надлежа-

шим образом, во всяком случае без натяжки. Это убедило меня в том, что в рамках специальной теории относительности нет места для удовлетворительной теории тяготения.

И вот мне пришло в голову: факт равенства инертной и весомой массы, или, иначе, тот факт, что ускорение свободного падения не зависит от природы падающего вещества, допускает и иное выражение. Его можно выразить так: в поле тяготения (малой пространственной протяженности) все происходит так, как в пространстве без тяготения, если в нем вместо «инерциальной» системы отсчета ввести систему, ускоренную относительно нее.

Значит, если считать, что поведение тел в ускоренной системе отсчета обусловлено как бы «истинным» полем тяготения (а не только кажущимся), то эту систему отсчета можно считать «инерциальной» с тем же правом, как и первоначальную систему.

Если считать возможными любые гравитационные поля, простирающиеся сколь угодно далеко и не ограниченные предельными условиями, то понятие инерциальной системы становится бессодержательным. Понятие «ускорение по отношению к пространству», а с ним и принцип инерции теряют тогда всякий смысл, причем исчезает также парадокс Маха.

Таким образом, равенство инертной и тяжелой массы приводит вполне естественно к мысли о том, что основное требование специальной теории относительности (инвариантность законов по отношению к преобразованию Лоренца) слишком узко, т. е. что нужно постулировать инвариантность законов и относительно *нелинейных* преобразований координат в четырехмерном континууме.

Это произошло в 1908 году. Почему понадобилось еще 7 лет, чтобы построить общую теорию относительности? Главная причина заключается в следующем: не так легко освободиться от представления, что координаты имеют прямой метрический смысл. Переворот совершался примерно так.

Мы исходим из пустого пространства без поля в том виде, как оно рассматривается — в инерциальной системе отсчета — в специальной теории относительности. Это есть простейший, физически возможный случай. Вообразим себе теперь инерциальную систему, введенную так, что она движется относительно инерциальной системы в одном направлении (в трехмерном смысле) с постоянным ускорением (соответственно определенным). По отношению к этой системе возникнет статическое параллельное поле тяготения. При этом систему отсчета можно взять жесткую с трехмерной евклидовой метрикой. Но в равноускоренной системе, в которой имеется статическое поле, часы *идут не так, как одинаково устроенные часы в неподвижной системе.*

Из этого частного примера уже видно, что непосредственно метрическое значение координат теряется, если вообще допускать нелинейные преобразования координат. Но делать это *необходимо*, если стремиться к тому, чтобы равенство тяжелой и инертной массы было заложено уже в основах теории, и если стремиться преодолеть парадокс Маха относительно инерциальных систем.

Но раз приходится отказаться от того, чтобы придавать координатам непосредственный метрический смысл (разность координат равна измеряемой длине или промежутку времени), то нельзя уже обойтись без признания равноценности всех координатных систем, получаемых путем непрерывных преобразований.

Сообразно этому общая теория относительности исходит из следующего основного положения. Законы природы должны выражаться такими уравнениями, которые были бы ковариантны относительно группы непрерывных преобразований координат. Эта группа становится здесь, таким образом, на место группы преобразований Лоренца специальной теории относительности; эта последняя группа является подгруппой первой группы.

Само по себе это требование еще не может, конечно, служить достаточно определенной исходной точкой для вывода основных уравнений физики. Прежде всего можно даже оспаривать, содержит ли это требование действительное ограничение для физических законов; в самом деле, если данный закон постулирован сперва только для некоторых координатных систем, то его всегда можно переформулировать так, чтобы новая формулировка имела уже общековариантный вид. Кроме того, с самого начала ясно, что существует бесчисленное множество уравнений поля, допускающих такую общековариантную формулировку. Выдающееся эвристическое значение общего принципа относительности состоит вот в чем: он приводит нас к отысканию тех систем уравнений, которые, будучи *общековариантными*, являются в то же время *наиболее простыми*; среди этих систем мы и должны искать уравнения поля, выражающие свойства физического пространства. Поля, получаемые одно из другого преобразованиями координат, отражают одну и ту же действительность.

Для искателя в этой области главным вопросом является следующий: какого математического характера будут величины (функции координат), через которые выражаются физические свойства пространства («структура»)? И уже потом: каким уравнениям удовлетворяют эти величины?

На эти вопросы мы сегодня отнюдь не можем еще ответить с уверенностью. Путь, по которому я пошел при первой формулировке общей теории относительности, может быть characterized следующим образом. Если мы и не знаем, каковы те переменные (та структура

поля), которыми следует описывать физическое пространство, то нам достоверно известен один частный случай: «свободное от поля» пространство специальной теории относительности. Такое пространство характеризуется тем, что в надлежаще выбранной системе координат относящееся к двум соседним точкам выражение

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2 \quad (1)$$

представляет измеримую величину (квадрат расстояния), следовательно, имеет реальный физический смысл. Отнесенная к произвольной системе эта величина выражается так:

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k, \quad (2)$$

где значки пробегают значения от 1 до 4. Величины g_{ik} образуют симметричный тензор. Если после выполнения преобразования над выражением (полем) (1) получаются g_{ik} с неисчезающими первыми производными по координатам, то по отношению к этой системе координат существует как бы гравитационное поле (в смысле вышеизложенного рассуждения), а именно: гравитационное поле совсем частного вида. Благодаря римановым исследованиям n -мерных метрических пространств это особое поле может быть инвариантно характеризовано следующим образом:

1) Риманов тензор кривизны R_{iklm} , образованный из коэффициентов метрики (2), равен нулю.

2) По отношению к инерциальной системе (в которой справедливо выражение (1)) траектория материальной точки есть прямая, а тем самым есть экстремаль (геодезическая). Последнее же утверждение представляет такую характеристику закона движения, которая опирается на выражение (2).

Общий закон физического пространства должен быть обобщением только что написанного закона. Тут я предположил, что имеются две степени обобщения:

а) чистое поле тяготения;

б) общее поле (в котором встречаются и величины, каким-то образом соответствующие электромагнитному полю).

Случай (а) характеризовался тем, что хотя поле все еще может быть представлено римановой метрикой (2) с соответствующим симметричным тензором, но при этом не существует представления вида (1) (кроме как в бесконечно малом). Это значит, что в случае (а) тензор Римана не исчезает. Однако ясно, что в этом случае должны быть справедливы уравнения поля, выражающие закон, который представ-

ляет собой обобщение (ослабление) прежнего закона. Если потребовать, чтобы эти уравнения тоже были второго порядка и линейные во вторых производных, то этим условиям удовлетворяют только уравнения

$$0 = R_{kl} = g^{im} R_{iklm},$$

получаемые из предыдущих однократным свертыванием. Только эти уравнения и могли рассматриваться как уравнения поля в случае (а). Далее, естественно считать, что и в случае (а) геодезическая по-прежнему дает закон движения материальной точки.

Попытка найти представление для полного поля (б) и получить для него уравнения казалась мне в то время бесперспективной, и я на нее не отважился. Я предпочел установить для изображения всей физической реальности предварительные формальные рамки. Это было нужно для того, чтобы иметь возможность исследовать, хотя бы предварительно, пригодность основной идеи общей относительности. Происходило это так.

В теории Ньютона можно написать в качестве закона для поля тяготения уравнение

$$\Delta\varphi = 0$$

(где φ — потенциал тяготения), которое должно выполняться в таких местах, где плотность ρ материи равна нулю. В общем случае следовало бы положить

$$\Delta\varphi = 4\pi k\rho \quad (\rho \text{ — плотность массы})$$

(уравнение Пуассона). В релятивистской теории поля тяготения на место $\Delta\varphi$ становится R_{ik} . В правую часть мы должны тогда поставить вместо ρ тоже тензор. Так как мы из частной теории относительности знаем, что (инертная) масса равна энергии, то в правую часть надлежит поставить тензор плотности энергии, точнее, полной плотности энергии, поскольку она не принадлежит чистому полю тяготения. Мы приходим, таким образом, к уравнению поля

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = -\kappa T_{ik}.$$

Второй член в левой части добавлен из формальных соображений, а именно: левая часть написана так, что ее расходимость в смысле абсолютного дифференциального исчисления тождественно равна нулю.

Правая часть включает в себя все то, что не может быть пока объединено в единой теории поля. Конечно, я ни одной минуты не сомневался в том, что такая формулировка есть только временный выход из положения, предпринятый с целью дать общему принципу относительности какое-то замкнутое выражение. Эта формулировка была ведь по существу *не более* чем теорией поля тяготения, несколько искусственно оторванного от единого поля еще неизвестной структуры.

В набросанной теории, помимо требования инвариантности уравнений по отношению к группе непрерывных преобразований координат, на безусловное (окончательное) значение может, пожалуй, претендовать только предельный случай чистого поля тяготения и связь этого поля с метрической структурой пространства. Поэтому мы сейчас будем говорить только об уравнениях чистого поля тяготения.

Своеобразием этих уравнений является, с одной стороны, их сложное строение, особенно их нелинейный характер по отношению к переменным поля и их производным, а с другой стороны, их единственность, т. е. та логическая необходимость, с которой группа преобразований определяет вид этих сложных уравнений. Если бы мы остановились на специальной теории относительности, т. е. на инвариантности относительно группы Лоренца, то уравнения поля $R_{ik} = 0$ остались бы инвариантными и в рамках этой более узкой группы. Но с точки зрения более узкой группы прежде всего не было бы никакого основания считать, что тяготение должно описываться такой сложной системой величин (структурой), какой является симметричный тензор g_{ik} . Если бы даже и можно было найти для этого достаточные причины, то оказалось бы, что существует несметное число уравнений поля, построенных из величин g_{ik} , которые все ковариантны относительно преобразований Лоренца (но не относительно общей группы). Даже если бы случайно удалось из всех мыслимых законов, инвариантных в группе Лоренца, угадать как раз тот, которому принадлежит более широкая группа, то все-таки мы бы не достигли той степени познания, какую дает нам общий принцип относительности. Ибо с точки зрения группы Лоренца два решения, связанные нелинейным преобразованием координат, должны были бы считаться физически различными, что неверно, так как с точки зрения общей группы они дают только два различных представления одного и того же поля.

Еще одно общее замечание о структуре поля и группе. Ясно, что, вообще говоря, теория представляется нам тем совершеннее, чем проще положенная в ее основу «структура» поля и чем шире та группа, относительно которой уравнения поля инвариантны. Но эти два требования, очевидно, вступают друг с другом в конфликт. Согласно специальной теории относительности (группа Лоренца), можно, например, написать

ковариантное уравнение уже для простейшей мыслимой структуры (скалярное поле), тогда как в общей теории относительности (более широкая группа непрерывных преобразований координат) инвариантные уравнения поля существуют только для более сложной структуры, а именно для симметричного тензора. В обоснование того, что в физике нужно требовать инвариантности относительно более широкой группы, мы привели *физические* доводы; с чисто математической точки зрения я не вижу необходимости приносить более простую структуру поля в жертву широте группы*.

Группа общей относительности впервые приводит к тому, что наиболее простой инвариантный закон уже не будет линейным и однородным в переменных поля и их производных. Это — обстоятельство фундаментальной важности, и вот по какой причине. Если уравнения поля линейны (и однородны), то сумма двух решений снова будет решением; это имеет место, например, для максвелловских уравнений поля в пустом пространстве. В такой (линейной) теории уравнений поля недостаточно для вывода закона взаимодействия между объектами, которые описываются (каждый в отдельности) решениями системы уравнений поля. Поэтому в прежних теориях необходимы были наряду с уравнениями поля особые уравнения, определяющие движение материальных объектов под действием поля. Правда, первоначально в релятивистской теории тяготения постулировался, наряду с законами для поля и независимо от него, также и закон движения (геодезическая). Но впоследствии выяснилось, что не нужно, да и нельзя, вводить закон движения независимо, а что он неявно содержится в законе для поля тяготения.

Сущность этого довольно сложного положения вещей можно представить себе более наглядно следующим образом. Одна-единственная неподвижная материальная точка изображается полем тяготения, которое, конечно, и регулярно везде, за исключением того места, где находится сама материальная точка; в этом месте поле имеет особенность. Если же путем интегрирования уравнений поля вычислить поле, соответствующее двум неподвижным материальным точкам, то оно будет иметь, помимо особенностей в материальных точках, также и особую линию, соединяющую материальные точки между собой. Но можно задать движение материальных точек так, чтобы определяемое ими поле тяготения вне материальных точек нигде не имело особенностей. Это будут как раз те движения, которые в

* Оставаться при более узкой группе и одновременно брать более сложную структуру поля (ту же, как в общей теории относительности) означает наивную непоследовательность. Грех остается грехом, хотя бы его совершали мужи, в остальном почтенные.

первом приближении описываются законами Ньютона. Таким образом, можно сказать: массы движутся так, что уравнения поля допускают решения, не имеющие особенностей в пространстве вне масс. Это свойство уравнений тяготения непосредственно связано с их нелинейностью, а она, в свою очередь, обусловлена более широкой группой преобразований.

Тут можно было бы, впрочем, высказать такое возражение. Если допускаются особенности в местах материальных точек, то какое тогда имеется оправдание для запрещения особенностей в остальном пространстве? Это возражение было бы оправдано в том случае, если бы уравнения тяготения могли рассматриваться как уравнения единого полного поля. При существующем же положении нам приходится говорить, что поле материальной частицы может рассматриваться как *чистое поле тяготения* с тем меньшим правом, чем ближе мы подходим к самой частице. Если бы мы имели уравнения для единого полного поля, то нужно было бы требовать, чтобы и самые частицы могли быть представлены как решения полных уравнений поля, *нигде* не имеющие особенностей. И только тогда общая теория относительности стала бы *замкнутой* теорией.

Прежде чем переходить к вопросу о завершении общей теории относительности, я должен высказаться о занимаемой мною позиции по отношению к той физической теории, которая из всех физических теорий нашего времени достигла наибольших успехов. Я имею в виду статистическую квантовую механику, которая приобрела стройную логическую форму около 25 лет тому назад (Шрёдингер, Гейзенберг, Дирак, Борн). Это единственная современная теория, дающая стройное объяснение тому, что мы знаем относительно квантового характера микромеханических процессов. Эта теория, с одной стороны, и теория относительности — с другой, обе в известном смысле считаются верными, хотя слияние этих теорий не удалось до сих пор несмотря на все усилия. С этим, должно быть, и связано то, что среди современных физиков-теоретиков имеются совершенно различные мнения о том, как будет выглядеть теоретический фундамент будущей физики. Будет ли это теория поля? Будет ли это теория в основном статистическая? Я скажу здесь кратко о том, что я об этом думаю.

Физика есть стремление осознать сущее как нечто такое, что мыслится независимым от восприятия. В этом смысле говорят о «физически реальном». В доквантовой физике не было сомнений, как это следует понимать. В теории Ньютона реальность представлялась материальными точками в пространстве и во времени, в теории Максвелла — полем в пространстве и во времени. В квантовой механике это менее ясно. Если

спросить: представляет ли функция ψ квантовой теории какое-то реальное положение вещей, реальное в том же смысле, как система материальных точек или электромагнитное поле, то люди медлят с простым ответом «да» или «нет». Почему? Функция ψ (в определенный момент времени) выражает следующее: какова вероятность того, что определенная физическая величина q (или p) окажется в определенном заданном интервале, если я буду ее измерять в момент t . Здесь вероятность должна рассматриваться как величина, доступная опытному определению, т. е. как величина безусловно «реальная». Определить ее я смогу, если я очень много раз буду создавать ту же самую функцию ψ и каждый раз буду измерять q . А как же обстоит дело с отдельным измерением q ? Обладала ли соответствующая индивидуальная система данным значением q уже до измерения? На этот вопрос в рамках теории нет определенного ответа, потому что ведь измерение есть процесс, означающий конечное внешнее вмешательство в систему; поэтому можно себе представить, что система получает определенное (а именно измеренное) численное значение q (или p) только в результате самого измерения. Для дальнейшей дискуссии я вообразу себе двух физиков, A и B , которые придерживаются различных пониманий реального состояния, описываемого функцией ψ .

A. Отдельная система обладает (до измерения) определенным значением q (или p) для всех переменных системы; это и есть то значение, которое устанавливается при измерении этих переменных. Исходя из этого понимания он объявит: функция ψ не есть исчерпывающее представление реального состояния системы; она выражает только то, что мы знаем о системе из прежних измерений.

B. Отдельная система не обладает (до измерения) определенным значением q (или p). Измеренное значение возникает только благодаря акту измерения с соответствующей этому значению вероятностью, получаемой из функции ψ . Исходя из этого понимания он объявит (или по крайней мере имеет право объявить): функция ψ есть исчерпывающее представление реального состояния системы.

А теперь мы предложим вниманию обоих этих физиков следующий случай. Пусть имеется система, состоящая (в рассматриваемый момент t) из двух подсистем S_1 и S_2 , которые в этот момент разделены пространственно и не взаимодействуют заметным образом в смысле классической физики. Пусть вся система полностью описывается в смысле квантовой механики известной волновой функцией, а именно функцией ψ_{12} . Все квантисты согласны между собой в следующем. Если я произведу полное измерение над S_1 , то из результатов измерения и из ψ_{12} я получу вполне определенную волновую функцию ψ_2 системы S_2 . При этом характер ψ_2 зависит от того, *какого рода измерение* произведено над S_1 . И вот мне кажется, что можно говорить о

реальном положении вещей в подсистеме S_2 . Об этом реальном положении вещей мы знаем наперед еще меньше, чем о системе, описанной волновой функцией. Но *одно* предположение представляется мне бесспорным. Реальное положение вещей (состояние) системы S_2 не зависит от того, что проделывают с пространственно отделенной от нее системой S_1 . Но в зависимости от того, какого рода измерение я произвожу над S_1 , я получаю для второй подсистемы разные ψ_2 (ψ_2, ψ'_2, \dots). Реальное состояние S_2 должно быть, однако, независимым от того, что происходит в S_1 . Значит, для одного и того же реального состояния S_2 могут быть найдены разные функции ψ_2 (в зависимости от выбора измерения над S_1). [Такого вывода можно было бы избежать только одним из двух способов. Или надо предположить, что измерение над S_1 изменяет (телепатически) реальное состояние S_2 , или же надо отрицать, что вещи, пространственно отделенные друг от друга, вообще могут иметь независимые реальные состояния. То и другое представляется мне совершенно неприемлемым.]

И вот, если физики A и B сочтут это рассуждение верным, то B должен будет отказаться от признания того, что функция ψ является полным описанием реального положения вещей. Потому что в этом случае было бы невозможно, чтобы одному и тому же положению вещей в (S_2) соответствовали две различные волновые функции.

Тогда статистический характер современной теории являлся бы необходимым следствием неполноты описания систем в квантовой механике, и не было бы уже никакого основания считать, что в будущем физика должна будет основываться на статистике.

Мое мнение сводится к тому, что если принять за основу некоторые понятия, заимствованные главным образом из классической механики, то современная квантовая теория может считаться наилучшей формулировкой реальных соотношений. Однако я не думаю, что эта теория является подходящей исходной точкой для будущего развития. Это тот пункт, в котором мои ожидания расходятся с ожиданиями большинства современных физиков, которые убеждены в том, что существенные черты квантовых явлений (как бы скачкообразные и не детерминированные во времени изменения состояния системы, корпускулярные и в то же время волновые свойства элементарных образований, несущих энергию) не могут быть учтены теорией, описывающей реальное состояние вещей непрерывными функциями координат, удовлетворяющими некоторым дифференциальным уравнениям. Они думают также, что таким путем нельзя будет истолковать атомную структуру вещества и излучения. Они ожидают, что системы дифференциальных уравнений, о которых может идти речь в такой теории, вообще не имеют решений регулярных (не имеющих особен-

ностей) во всем четырехмерном пространстве. Но прежде всего они считают, что, видимо, скачкообразный характер элементарных процессов может быть отображен только теорией, являющейся по существу статистической; в такой теории скачкообразные изменения состояния систем должны учитываться путем *непрерывного* изменения вероятностей возможных состояний.

Все эти замечания кажутся мне довольно вескими. Но главный вопрос заключается, как мне кажется, в следующем.

Какое направление обещает успех при сегодняшнем состоянии теории? При выборе направления я склонен руководствоваться моим опытом построения теории тяготения. Уравнения этой теории подаются, по моему мнению, большие надежды на получение чего-либо *точного*, чем все остальные уравнения физики. Возьмем для сравнения, например, уравнения Максвелла для пустого пространства. Они являются формулировкой, соответствующей наблюдениям над бесконечно слабыми электромагнитными полями. Это эмпирическое происхождение уже обуславливает их линейную форму; но мы уже указывали, что истинные законы не могут быть линейными. Линейные законы удовлетворяют в отношении решений принципу суперпозиции и, следовательно, ничего не говорят относительно взаимодействий элементарных образований. Истинные законы не могут быть линейными и не могут быть получены из линейных законов. Теория тяготения научила меня и другому: собрание эмпирических фактов, как бы обширно оно ни было, не может привести к установлению таких сложных уравнений. На опыте можно проверить теорию, но нет пути от опыта к построению теории. Уравнения такой степени сложности, как уравнения поля тяготения, могут быть найдены только путем нахождения логически простого математического условия, определяющего вполне или почти вполне вид этих уравнений. Но когда такие достаточно жесткие формальные условия уже установлены, то для построения теории требуется совсем немного фактических данных. В случае уравнений тяготения такими формальными условиями являются: наличие четырех измерений и предположение о том, что структура пространства определяется симметричным тензором. Эти условия вместе с требованием инвариантности относительно группы непрерывных преобразований определяют вид уравнений практически вполне однозначно.

Наша задача состоит в том, чтобы найти уравнения для полного поля. Искомая структура поля должна быть обобщением симметрического тензора. Группа не должна быть более узкой, чем группа непрерывных преобразований координат. Если теперь ввести более сложную структуру, то эта группа уже не будет так жестко определять

уравнения, как в случае структуры, характеризуемой симметричным тензором. Поэтому прекраснее всего было бы, если бы удалось снова расширить группу, по аналогии с тем шагом, который привел от специальной теории относительности к общей. Я пробовал, в частности, привлечь сюда группу комплексных преобразований координат. Все такие попытки были безуспешны. Я отказался также и от явного или скрытого увеличения числа измерений пространства. Это направление было намечено Калуцей, и оно еще и сейчас имеет своих сторонников (в своем проективном варианте). Мы ограничиваемся четырехмерным пространством и группой непрерывных вещественных преобразований координат. После многих лет тщетных поисков я считаю логически наиболее удовлетворительным решение, набросок которого дается дальше.

Вместо симметричных g_{ik} ($g_{ik} = g_{ki}$) вводится несимметричный тензор g_{ik} . Эта величина составлена из симметричной части s_{ik} и из антисимметричной части a_{ik} , которая может быть вещественной или чисто мнимой. Мы имеем:

$$g_{ik} = s_{ik} + a_{ik}.$$

С точки зрения групповых свойств такое объединение s_{ik} и a_{ik} является искусственным, поскольку каждая из этих величин и в отдельности имеет характер тензора. Однако оказывается, что эти g_{ik} (рассматриваемые как целое) играют в построении новой теории такую же роль, как симметричные g_{ik} в теории поля тяготения.

Это обобщение структуры пространства представляется естественным и с точки зрения наших физических познаний, потому что мы знаем, что электромагнитное поле связано с кососимметричным тензором.

Далее, для теории тяготения существенно, что из симметричных g_{ik} можно образовать скалярную плотность $\sqrt{\|g_{ik}\|}$, а также и контравариантный тензор g^{ik} согласно определению $g_{ik} = g^{il} \delta_k^l$ (δ_k^l — символ Кронекера). Образованные таким путем величины, а также тензорные плотности допускают совершенно аналогичное определение и для несимметричных g_{ik} .

Далее, в теории тяготения существенно, что для данного симметричного поля g_{ik} можно определить симметричное в нижних значках поле Γ_{ik}^l , геометрический смысл которого состоит в том, что оно определяет параллельный перенос вектора. Аналогично, для несимметричных g_{ik} можно определить несимметричные Γ_{ik}^l по формуле

$$g_{ik,l} - g_{sh} \Gamma_{il}^s - g_{is} \Gamma_{lk}^s = 0. \quad (A)$$

Это соотношение совпадает с соответствующим соотношением для симметричных g с той только разницей, что здесь, конечно, нужно обращать внимание на положение нижних значков в величинах g и Γ .

Как и в вещественной теории, из Γ можно образовать кривизну R_{iklm} и из нее, путем свертывания, кривизну R_{kl} . Наконец, пользуясь некоторым вариационным принципом с соотношениями (А), можно найти совместные между собой уравнения поля:

$$g_s^{ik} = 0 \text{ [где } g^{ik} = \frac{1}{2}(g^{ik} - g^{ki})\sqrt{\|g_{il}\|}], \quad (B_1)$$

$$\Gamma_{is}^s = 0 \text{ [где } \Gamma_{is}^s = \frac{1}{2}(\Gamma_{is}^s - \Gamma_{si}^s)], \quad (B_2)$$

$$R_{kl} = 0, \quad (C_1)$$

$$S_{hl,m} + R_{lm,h} + R_{mh,l} = 0. \quad (C_2)$$

При этом каждое из уравнений (B₁), (B₂) является следствием другого, если выполнено (А). Символ R_{kl} означает симметричную, а символ R_{ij} — антисимметричную часть величины R_{ik} .

В случае равенства нулю антисимметричной части g_{ik} эти формулы приводятся к (А) и (C₁). Это будет случай чистого поля тяготения.

Мне кажется, что эти формулы представляют собой наиболее естественное обобщение уравнений тяготения.* Проверка их физической пригодности — задача чрезвычайно трудная, потому что здесь приближения ничего не дают. Вопрос в следующем. Какие существуют решения этих уравнений, не имеющие особенностей во всем пространстве?

Этот рассказ достиг своей цели, если он показал читателю, как связаны между собой усилия целой жизни и почему они привели к ожиданиям определенного рода.

1949 г.

* Если только вообще можно идти по пути исчерпывающего представления физической реальности на основе понятия континуума, то, по моему мнению, имеется довольно большая вероятность, что предложенная здесь теория подтвердится.

Автобиографические наброски

В 1895 г. в шестнадцатилетнем возрасте я приехал из Италии в Цюрих, после того как без школы и без учителя провел год в Милане у родителей. Моей целью было поступление в политехникум, хотя я не совсем ясно представлял себе, как это можно осуществить. Я был своенравным, но скромным молодым человеком, который приобрел свои необходимые знания спорадически, главным образом путем самообразования. Я жаждал глубоких знаний, но обучение не казалось мне легкой задачей: я был мало приспособлен к заучиванию и обладал плохой памятью. С чувством вполне обоснованной неуверенности я явился на вступительный экзамен на инженерное отделение. Экзамен показал мне прискорбную недостаточность моей подготовки, несмотря на то, что экзаменаторы были снисходительны и полны сочувствия. Я понимал, что мой провал был вполне оправдан. Отрадно было лишь то, что физик Г.Ф. Вебер сказал мне, что я могу слушать его коллег, если останусь в Цюрихе. Но ректор, профессор Альбин Герцог, рекомендовал меня в кантональную школу в Аарау, где после годичного обучения я сдал экзамен на аттестат зрелости. Эта школа оставила во мне неизгладимый след благодаря своему либеральному духу и скромной серьезности учителей, которые не опирались на какие-либо показные авторитеты; сравнение с шестилетним обучением в авторитарно управляемой немецкой гимназии убедительно показало мне, насколько воспитание в духе свободы и чувства личной ответственности выше воспитания, которое основано на муштре, внешнем авторитете и честолюбии. Настоящая демократия не является пустой иллюзией.

В том же году в Аарау у меня возник вопрос: если бы можно было погнаться за световой волной со скоростью света, то имели бы мы

Autobiographische Skizze. Helle Zeit — dunkle Zeit. In Memorium Albert Einstein. Herausgegeben von Carl Seelig. Zurich, 1956.

перед собой независящее от времени волновое поле? Такое все-таки кажется невозможным! Это был первый детский мысленный эксперимент, который относился к специальной теории относительности. Открытие не является делом логического мышления, даже если конечный продукт связан с логической формой.

1896—1900 годы — обучение на отделении преподавателей специальных дисциплин швейцарского политехникума. Вскоре я заметил, что довольствуюсь ролью посредственного студента. Для того чтобы быть хорошим студентом, нужно обладать легкостью восприятия; готовностью сконцентрировать свои силы на всем том, что читается на лекции; любовью к порядку, чтобы записывать и затем добросовестно обрабатывать преподносимое на лекциях. Всех этих качеств мне основательно не доставало, как я с сожалением установил. Так постепенно я научился ладить с не совсем чистой совестью и организовывать свое ученье так, как это соответствовало моему интеллектуальному желудку и моим интересам. Некоторые лекции я слушал с большим интересом. Но обыкновенно я много «прогуливал» и со священным рвением штудировал дома корифеев теоретической физики. Само по себе это было хорошо и служило также тому, что нечистая совесть так действительно успокоилась, что душевное равновесие не нарушалось сколько-нибудь заметно. Это широкое самостоятельное обучение было простым продолжением более ранней привычки; в нем принимала участие сербская студентка Милева Марич, которая позднее стала моей женой. Однако в физической лаборатории профессора Г.Ф. Вебера я работал со рвением и страстью. Захватывали меня также лекции профессора Гейзера по дифференциальной геометрии, которые были настоящими шедеврами педагогического искусства и очень помогли мне позднее в борьбе, развернувшейся вокруг общей теории относительности. Но высшая математика еще мало интересовала меня в студенческие годы. Мне ошибочно казалось, что это настолько разветвленная область, что можно легко растратить всю свою энергию в далекой провинции. К тому же по своей наивности я считал, что для физики достаточно твердо усвоить элементарные математические понятия и иметь их готовыми для применения, а остальное состоит в бесполезных для физики тонкостях — заблуждение, которое только позднее я с сожалением осознал. У меня, очевидно, не хватало математических способностей, чтобы отличить центральное и фундаментальное от периферийного и не принципиально важного.

В эти студенческие годы развилась настоящая дружба с товарищем по учебе Марселем Гроссманом. Раз в неделю мы торжественно шли с ним в кафе «Метрополь» на набережной Лиммат и разговаривали не только об учебе, но и сверх того обо всех вещах, которые могут

интересовать молодых людей с открытыми глазами. Он не был таким бродягой и чудаком, как я, но был связан со швейцарской средой и в пределах возможного не потерял внутренней самостоятельности. Кроме того, он обладал в избытке как раз теми данными, которых мне не хватало: быстрым восприятием и порядком во всех отношениях. Он не только посещал все лекции, которые мы считали важными, но и обрабатывал их так замечательно, что если бы его тетради перепечатать, то их вполне можно было бы издать. Для подготовки к экзаменам он одалживал мне эти тетради, которые служили для меня спасательным кругом; о том, как мне жилось бы без них, лучше не гадать.

Несмотря на эту неоценимую помощь и вопреки тому, что все читавшиеся нам предметы сами по себе были интересными, я должен был перебороть себя, чтобы основательно изучить все эти вещи. Для людей моего типа, склонных к долгому раздумью, университетское образование не является безусловно благодатным. Если человека заставить съесть много хорошего, он может надолго испортить себе аппетит и желудок. Огонек священного любопытства может надолго угаснуть. К счастью, у меня эта интеллектуальная депрессия после благополучного окончания учебы длилась только год.

Самое большое из того, что сделал для меня Марсель Гроссман как друг, было следующее. Приблизительно через год после окончания обучения он рекомендовал меня через отца директору Швейцарского патентного бюро Фридриху Галлеру, которое тогда еще называлось «Бюро духовной собственности». После обстоятельного устного испытания господин Галлер принял меня на службу. Благодаря этому в 1902–1909 годах, как раз в годы наиболее продуктивной деятельности, я был избавлен от забот о существовании. Кроме того, работа над окончательной формулировкой технических патентов была для меня настоящим благословением. Она принуждала к многостороннему мышлению, а также давала импульс для физических размышлений. Наконец, практическая профессия вообще является благословением для людей моего типа. Ибо академическая карьера вынуждает молодых людей производить научные труды во все возрастающем количестве, что приводит к соблазну поверхностности, которому могут противостоять только сильные характеры. Большинство практических профессий относятся, далее, к такому роду, что человек нормальных способностей в состоянии выполнить то, чего от него ждут. В своем житейском существовании он не зависит от особых озарений. Если у него есть более глубокие научные интересы, то наряду со своей обязательной работой он может погрузиться в свою любимую проблему. Его не должна угнетать боязнь того, что его усилия могут остаться безрезультатными.

Тем, что я оказался в таком счастливом положении, я обязан Марселю Гроссману.

Из событий научного характера, которые относятся к тем счастливым годам в Берне, я упомяну лишь одно, которое привело к наиболее плодотворной идее в моей жизни. Специальной теории относительности было уже несколько лет, когда возник вопрос: ограничен ли принцип относительности инерциальными системами, т. е. системами координат, которые движутся равномерно друг относительно друга (линейные преобразования координат)? Врожденный инстинкт подсказывает: «Вероятно, нет!». Но основное положение всей прежней механики — принцип инерции — как будто бы исключает всякое расширение принципа относительности. А именно: если ввести систему координат, движущуюся с ускорением (по отношению к инерциальной системе), то «изолированная» точечная масса больше не движется прямолинейно и равномерно относительно этой системы.

Ум, не связанный установившимися привычками, спросил бы теперь: а не дает ли мне в руки это поведение способ отличить инерциальную систему от неинерциальной? Он должен был бы затем прийти к выводу (по крайней мере в случае прямолинейного равноускоренного движения), что это не так. Ибо механическое поведение тел относительно такой ускоренной системы координат можно интерпретировать так же, как действие гравитационного поля; это можно сделать благодаря эмпирическому факту, который заключается в том, что в гравитационном поле ускорение тел независимо от их природы всегда одно и то же. Знание этого (принцип эквивалентности) сделало вероятным не только то, что законы природы должны быть инвариантными по отношению к общей группе преобразований Лоренца (расширение принципа относительности), но также и то, что это расширение должно привести к углубленной теории гравитационного поля. В том, что эта идея в принципе является правильной, я по меньшей мере не сомневался. Но трудности ее осуществления казались почти непреодолимыми. Прежде всего элементарные соображения показывали, что переход к более широкой группе преобразований несовместим с прямой интерпретацией пространственно-временных координат, которая проложила путь специальной теории относительности. Кроме того, нельзя было усмотреть, как должна быть выбрана расширенная группа преобразований. В действительности мне удалось подойти к этому принципу эквивалентности окольным путем, описание которого здесь неуместно.

В 1909—1912 годах, в то время как я занимался теоретической физикой в Цюрихском и Пражском университетах, я непрерывно размышлял об этой проблеме. В 1912 году, когда меня пригласили на работу в

Цюрихский политехникум, я уже значительно ближе подошел к решению этой проблемы. Важным здесь оказался анализ Германа Минковского формальных основ специальной теории относительности. Его можно сконцентрировать в следующем предложении: четырехмерное пространство имеет (инвариантную) псевдоевклидову метрику; она определяет метрические свойства пространства, которые можно констатировать экспериментально, а также принцип инерции и, сверх того, форму системы уравнений, инвариантных относительно преобразований Лоренца. В этом пространстве имеются предпочтительные, а именно, квазидекартовы системы координат, которые являются здесь единственными «естественными» (инерциальные системы).

Принцип эквивалентности позволяет нам ввести в таком пространстве нелинейные преобразования координат, т. е. недекартовы («криволинейные») координаты. Псевдоевклидова метрика принимает при этом общую форму

$$ds^2 = \sum g_{ik} dx_i dx_k ;$$

суммирование ведется по индексам i и k (от 1 до 4). Эти g_{ik} являются тогда функциями четырех координат, которые, согласно принципу эквивалентности, кроме метрики описывают также «гравитационное поле». Конечно, гравитационное поле здесь имеет совершенно особый вид. Ибо с помощью преобразования метрики можно перевести в специальную форму

$$-dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2 + dx_4^2,$$

т. е. в форму, в которой g_{ik} не зависят от координат. В этом случае описываемое посредством d_{ik} гравитационное поле можно «оттрансформировать». В последней специальной форме инерционные свойства изолированных тел выражаются (временноподобной) прямой линией. В общей форме им соответствуют «геодезические линии».

Эта формулировка относилась, правда, все еще к случаю псевдоевклидова пространства. Однако она ясно показала, как нужно осуществлять переход к гравитационным полям общего вида. Здесь также необходимо описывать гравитационное поле посредством некоторого рода метрики, т. е. симметричного тензорного поля g_{ik} . Обобщение состоит просто в том, что теперь нужно отбросить предположение о том, что это поле можно превратить в псевдоевклидово с помощью простого преобразования координат.

Тем самым проблема гравитации была сведена к чисто математической. Существуют ли дифференциальные уравнения для g_{ik} , которые

инвариантны относительно нелинейных преобразований координат? Такие и только такие дифференциальные уравнения принимались во внимание как уравнения гравитационного поля. Закон движения материальной точки давался бы тогда уравнением геодезической линии.

С этой задачей в голове я навел в 1912 году моего старого студенческого друга Марселя Гроссмана, который тем временем стал профессором математики в Швейцарском политехникуме. Он тотчас загорелся, хотя как настоящий математик имел несколько скептическую точку зрения на физику. Когда мы оба были еще студентами и привычным образом обменивались в кафе нашими мыслями, он сделал однажды такое прекрасное, характерное замечание, что я не могу его здесь не процитировать: «Я полагаю, что из изучения физики я все же почерпнул кое-что существенное. Когда раньше я садился на стул и ощущал еще остаток тепла, которое принадлежало «председателю», мне было неприятно. Все это совершенно прошло, так как физика научила меня, что теплота есть нечто совершенно безличное».

Вышло так, что хотя он охотно согласился совместно поработать над проблемой, но все-таки с тем ограничением, что он не берет на себя никакой ответственности за какие-либо физические утверждения и интерпретации. Он тщательно просмотрел литературу и скоро обнаружил, что указанная математическая проблема была уже решена прежде всего Риманом, Риччи и Леви-Чивитой. Это развитие в целом примыкало к теории кривизны поверхностей Гаусса; в этой теории впервые были систематически использованы обобщенные координаты. Достижения Римана были наибольшими. Он показал, как из поля тензоров g_{ik} можно получить вторые производные. Из этого следовало, как должны выглядеть уравнения поля гравитации в случае, если поставлено требование инвариантности относительно группы всех непрерывных преобразований координат. Однако не так легко было принять это требование как обоснованное, так как я считал, что против него можно найти какие-то возражения. Эта, разумеется, ошибочная мысль привела к тому, что в своей окончательной форме теория появилась только в 1916 году.

В то время как я усердно работал совместно с моим другом, никто из нас не думал, что злой недуг так скоро унесет этого замечательного человека. Потребность по крайней мере один раз в жизни выразить мою благодарность Марселю Гроссману придала мне смелость написать эти довольно пестрые автобиографические наброски.

Со времени завершения теории гравитации теперь прошло уже сорок лет. Они почти исключительно были посвящены усилиям вывести путем обобщения из теории гравитационного поля единую теорию поля, которая могла бы образовать основу для всей физики. С

той же целью работали многие. Некоторые обнадеживающие попытки я впоследствии отбросил. Но последние десять лет привели, наконец, к теории, которая кажется мне естественной и обнадеживающей. Я не в состоянии сказать, могу ли я считать эту теорию физически полноценной; это объясняется пока еще непреодолимыми математическими трудностями; впрочем, такие же трудности представляет применение любой нелинейной теории поля. Кроме того, вообще кажется сомнительным, может ли теория поля объяснить атомистическую структуру вещества и излучения, а также квантовые явления. Большинство физиков, несомненно, ответят убежденным «нет», ибо они считают, что квантовая проблема должна решаться принципиально иным путем. Как бы то ни было, нам остаются в утешение слова Лессинга: «Стремление к истине ценнее, дороже уверенного обладания ею».

1955 г.

Эрнст Мах

В эти дни от нас навсегда ушел Эрнст Мах, человек, обладавший редкой независимостью взглядов и оказавший огромное влияние на гносеологическую ориентацию естествоиспытателей нашего времени. Способность искренне радоваться созерцанию и познанию мира, *amor dei intellectualis* Спинозы, была развита у него настолько сильно, что он до глубокой старости смотрел на мир любопытными глазами ребенка и безмятежно радовался, познавая открывающиеся связи явлений этого мира.

Как вообще могло случиться, что столь одаренный естествоиспытатель вынужден был заботиться о теории познания? Разве по его собственной специальности ему не осталось достойной работы? Такие вопросы мне иногда приходится слышать от некоторых моих коллег. Еще чаще такие вопросы если и не задаются вслух, то подразумеваются. Я не могу разделять таких убеждений. Мне приходят на ум наиболее сильные студенты, которых мне довелось встречать в процессе моей преподавательской деятельности, т. е. студенты, отличающиеся не только умением быстро отвечать на вопросы, но и самостоятельностью мышления. Должен сказать, что такие студенты живо интересовались теорией познания. Они охотно вступали в дискуссии о целях и методах науки, и их упорство в отстаивании собственных точек зрения недвусмысленно показывало, что этот предмет представляется им чрезвычайно важным. И этому, право, не следует удивляться.

Если я посвятил себя науке, руководствуясь не такими чисто внешними мотивами, как добывание денег или удовлетворение своего честолюбия, и не потому (по крайней мере, не только потому), что считаю ее спортом, гимнастикой ума, доставляющей мне удовольствие, то один вопрос должен представлять для меня как

приверженца науки жгучий интерес: какую цель должна и может ставить перед собой наука, которой я себя посвятил? Насколько «истинны» ее основные результаты? Что в них существенно и что зависит лишь от случайностей ее развития?

Чтобы по достоинству оценить заслуги Маха, не следует пытаться ответить на вопрос: «Что нового внес Мах во все эти общие вопросы и что не приходило в голову никому другому до него?». Истину в подобного рода вопросах сильным натурам всегда приходится добывать заново, в соответствии с потребностями своего времени, ради удовлетворения которых и работает творческая личность. Если эта истина не будет постоянно воссоздаваться, то она окажется вообще для нас потерянной. Поэтому так трудно ответить на вопрос: «Что принципиально нового знал Мах по сравнению с тем, что знали Бэкон и Юм? Что существенно отличает его от Стюарта Милля, Кирхгофа, Герца, Гельмгольца, что достигнуто им с общей гносеологической точки зрения в отношении конкретных наук?». Дело в том, что Мах своими историко-критическими статьями, в которых он с такой любовью проследил за процессом становления отдельных наук и раскрыл внутреннюю лабораторию отдельных исследователей, проложивших новые пути в своих областях науки, оказал огромное влияние на ученых нашего поколения.

Я даже думаю, что те, кто считает себя противником Маха, вряд ли сознают, сколько высказанных им идей они, так сказать, впитали с молоком матери.

По Маху, наука представляет собой не что иное как сопоставление и упорядочение реально данных нам ощущений в соответствии с некоторыми постепенно выработанными нами точками зрения и методами. Таким образом, физика и психология отличаются друг от друга не предметом, а точками зрения, в соответствии с которыми упорядочен и объединен материал. Мах видел важнейшую задачу этих наук, занимающих особое место в его исследованиях, в том, чтобы проследить, как это упорядочение осуществляется в конкретных деталях. В результате такого упорядочения возникают абстрактные понятия и законы (правила), связывающие их. И те, и другие выбираются с таким расчетом, чтобы вместе они составляли схему упорядочения, в соответствии с которой упорядочиваемые данные можно расположить в виде легко обозримых рядов. В силу сказанного понятия имеют смысл лишь в той мере, в какой они позволяют выявить относящиеся к ним вещи, а также точку зрения, в соответствии с которой эти вещи упорядочены (анализ понятий).

Значение таких мыслителей, как Мах, состоит отнюдь не только в том, что они удовлетворяют определенные философские потреб-

ности своего времени, которые ученые, занимающиеся конкретными вопросами своей науки, могли бы считать роскошью. Понятия, которые оказываются полезными при упорядочении вещей, легко завоевывают у нас такой авторитет, что мы забываем об их земном происхождении и воспринимаем их как нечто неизменно данное. В этом случае их называют «логически необходимыми», «априорно данными» и т. д. Подобные заблуждения часто надолго преграждают путь научному прогрессу. Поэтому анализ давно используемых нами понятий и выявление обстоятельств, от которых зависит их обоснованность, пригодность, и того, как они возникают из данных опыта, не является праздной забавой. Такой анализ позволяет подорвать излишне большой авторитет этих понятий. Они будут отброшены, если их не удастся узаконить должным образом, исправлены, если они не вполне точно соответствуют данным вещам, заменены другими, если необходимо создать какую-нибудь новую, в каких-то отношениях более предпочтительную систему.

Ученому, занимающемуся конкретными проблемами, чье внимание привлекают лишь частности, подобный анализ покажется излишним, претенциозным и даже смешным. Однако ситуация меняется, когда развитие соответствующей науки требует, чтобы какое-нибудь обычно употребляемое понятие было заменено новым, более точным. Тогда те, кто обращался с понятиями своей науки, не особенно вдаваясь в их смысл, начинают энергично протестовать и жаловаться на революционную угрозу, грозящую духовным благам. К этим крикам примешиваются голоса и тех философов, которые считают, что не могут обойтись без этого понятия, ибо они включили его в сокровищницу понятий, называемых ими «абсолютными», «априорными», или, короче, провозгласили принципиальную неизменность последних.

Читатель уже догадался, что я имею в виду в основном те понятия учения о пространстве и времени, а также те понятия механики, которые претерпели некоторые изменения под влиянием теории относительности. Никто не может отрицать, что в этом случае теория познания указала путь дальнейшего развития. Что же касается меня лично, то я должен сказать, что мне, прямо или косвенно, особенно помогли работы Юма и Маха.

Я прошу читателя взять в руки работу Маха «Механика. Историко-критический очерк ее развития» и прочитать рассуждения, содержащиеся в разделах 6 и 7 второй главы («Взгляды Ньютона на время, пространство и движение» и «Критический обзор ньютоновских представлений»). В этих разделах мастерски изложены мысли, которые до сих пор еще не стали общим достоянием физиков. Эти раз-

дела представляют для нас особый интерес еще и потому, что содержат дословно цитированные отрывки из «Начал» Ньютона. Приведем несколько наиболее важных мест.

Ньютон: «Абсолютное, истинное, математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно, иначе оно называется длительностью».

«Относительное, кажущееся или обыденное, время есть 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».*

Мах: «...Если положение некоторого предмета *A* изменяется со временем, то это означает лишь, что состояние предмета *A* зависит от состояния некоторого другого предмета *B*. Колебания маятника протекают *во времени*, ибо его отклонения зависят от положения Земли. Так как при наблюдении маятника нам не нужно принимать во внимание зависимость его отклонений от положения Земли, мы можем сравнить его отклонение с положением какого-либо другого предмета <...>, в результате чего может создаться иллюзия о несущественности всех этих предметов... Мы не в состоянии измерять изменения предметов *во времени*. Более того, время является абстракцией, к которой мы приходим через изменение предметов. У нас нет никакой определенной меры времени, ибо все связано между собой».**

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

«Относительное есть его мера или какая-либо его ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел, которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное».

Далее следует соответствующее определение понятий абсолютного движения и относительного движения. Вот оно:

«Проявления, которыми различаются абсолютное и относительное движение, состоят в силах стремления удалиться от оси вращательного движения, ибо в чисто относительном вращательном движении эти силы равны нулю, в истинном же и абсолютном они больше или меньше, сообразно количеству движения».***

* *Исаак Ньютон*. Математические начала натуральной философии. Перевод А.Н. Крылова. (См. также: Собр. соч. А.Н. Крылова, т. 7, М., 1936.) — *Прим. ред.*

** *Э. Мах*. Механика. СПб., 1909, с. 186. — *Прим. ред.*

*** *И. Ньютон*. Цит. соч., с. 33. — *Прим. ред.*

Затем следует описание известного опыта с ведром, который должен служить наглядным обоснованием последнего утверждения.

Очень интересна осуществляемая Махом критика этой точки зрения. Я приведу лишь наиболее выразительные места из той же «Механики».*

«Когда мы говорим, что тело K изменяет направление движения и скорость только под действием другого тела K' , мы никогда не сможем узнать этого, если не будет других тел A, B, C, \dots , относительно которых можно было бы судить о движении тела K . Следовательно, мы познаем, собственно говоря, некоторое отношение тела K к телам A, B, C, \dots . Если же мы не будем принимать в расчет тела A, B, C, \dots и будем говорить о поведении тела K в абсолютном пространстве, то мы совершим при этом двойную ошибку. Во-первых, мы не можем знать, как вело бы себя тело K в отсутствие тел A, B, C, \dots . Во-вторых, у нас не будет никаких средств, с помощью которых можно было бы проследить за поведением тела K и проверить наши суждения, которые в силу этого не будут иметь никакого физического смысла».

«О движении тела K можно судить лишь по отношению к другим телам A, B, C, \dots . Поскольку в нашем распоряжении всегда имеется достаточное количество жестко закрепленных или медленно меняющих свое положение друг относительно друга тел, мы не должны вести отсчет относительно какого-то одного *определенного* тела и исключать из рассмотрения то одно из этих тел, то другое. Отсюда и возникает мнение, будто эти тела вообще несущественны».

«Опыт Ньютона с вращающимся сосудом, наполненным водой, показывает лишь, что при вращении воды относительно *стенок* сосуда сколько-нибудь заметных центробежных сил не возникает, но что такие силы появляются при вращении воды относительно Земли или других небесных тел. Никто не может сказать, как протекал бы опыт, если бы стенки сосуда становились все толще и массивнее, пока, наконец, не достигли бы толщины в несколько миль...»

Приведенные строки показывают, что Мах ясно понимал слабые стороны классической механики и был недалек от того, чтобы прийти к общей теории относительности. И это за полвека до ее создания! Весьма вероятно, что Мах сумел бы создать общую теорию относительности, если бы в то время, когда он еще был молод душой, физиков волновал вопрос о том, как следует понимать постоянство скорости света. При отсутствии интереса к факту постоянства скорости света, вытекающему из электродинамики Мак-

* Э. Мах. Цит. соч., с. 191. — Прим. ред.

светла—Лоренца, потребности Маха в критике оказались недостаточными, чтобы он смог почувствовать необходимость определения одновременности пространственно разделенных событий.

Рассуждения Маха о ньютоновском «опыте с ведром» показывают, сколь близко его духу было требование относительности в обобщенном смысле (относительности ускорения). Во всяком случае, в этих рассуждениях чувствуется ясное понимание того, что требование равенства инертной и тяжелой массы тел приводит к постулату относительности в более широком смысле, ибо с помощью эксперимента мы не можем отличить, обусловлено ли падение тела относительно некоторой системы отсчета наличием какого-то гравитационного поля или ускорением системы отсчета.

По своим духовным запросам Мах был не философом, избравшим естественные науки объектом своих умозрительных построений, а естествоиспытателем, отличающимся разносторонностью интересов и упорством в работе, которому мог доставить огромное удовольствие какой-нибудь частный вопрос, лежащий в стороне от проблем, привлекавших всеобщее внимание. Именно этим объясняются его многочисленные исследования по конкретным проблемам из области физики и эмпирической психологии, которые он опубликовал частично под своим именем, частично вместе со своими учениками. Из его физических экспериментальных работ наибольшую известность получили исследования звуковых волн, образующихся при полете снарядов. Хотя эти исследования и не были основаны на принципиально новых идеях, они все же показали чрезвычайную одаренность Маха как экспериментатора. Ему удалось с помощью фотосъемки установить распределение плотности воздуха в окрестности снаряда, летящего со сверхзвуковой скоростью, и пролить свет на целый класс неизвестных до него акустических процессов. Его популярная лекция на эту тему доставит каждому радость, какую только может дать физика.

Философские исследования Маха были вызваны лишь желанием выработать точку зрения, позволяющую единым образом рассматривать различные области науки, которым он посвятил всю свою жизнь. Он считал, что все науки объединены стремлением к упорядочению элементарных единичных данных нашего опыта, названных им «ощущениями». Этот термин, введенный трезвым и осторожным мыслителем, часто из-за недостаточного знакомства с его работами путают с терминологией философского идеализма и солипсизма.

При чтении работ Э. Маха чувствуется, что автор получал удовольствие, находя красочные и меткие формулировки для своих мыслей. Однако не только интеллектуальное удовольствие и удовольствие от хорошего стиля делают столь привлекательным чтение его книг. Часто, особенно когда он говорит об общечеловеческих вещах, между строк сквозит его доброжелательное и человеколюбивое отношение к окружающим. Это отношение защитило его от болезни, пощадившей ныне лишь немногих, — от национального фанатизма. В последнем абзаце своей популярной статьи «О явлениях, происходящих при полете снарядов» он не мог не выразить надежду на будущее взаимопонимание между народами.

1916 г.

Природа реальности

Беседа с Рабиндранатом Тагором

Эйнштейн. Вы верите в Бога, изолированного от мира?

Тагор. Не изолированного. Неисчерпаемая личность человека постигает Вселенную. Ничего непостижимого для человеческой личности быть не может. Это доказывает, что истина Вселенной является человеческой истиной.

Чтобы пояснить свою мысль, я воспользуюсь одним научным фактом. Материя состоит из протонов и электронов, между которыми ничего нет, но материя может казаться сплошной, без связей в пространстве, объединяющих отдельные электроны и протоны. Точно так же человечество состоит из индивидуумов, но между ними существует взаимосвязь человеческих отношений, придающих человеческому обществу единство живого организма. Вселенная в целом так же связана с нами, как и индивидуум. Это — Вселенная человека.

Высказанную идею я проследил в искусстве, литературе и религиозном сознании человека.

Эйнштейн. Существуют две различные концепции относительно природы Вселенной:

- 1) мир как единое целое, зависящее от человека;
- 2) мир как реальность, не зависящая от человеческого разума.

Тагор. Когда наша Вселенная находится в гармонии с вечным человеком, мы постигаем ее как истину и ощущаем ее как прекрасное.

Эйнштейн. Но это — чисто человеческая концепция Вселенной.

Тагор. Другой концепции не может быть. Этот мир — мир человека. Научные представления о нем — представления ученого. Поэтому мир отдельно от нас не существует. Наш мир относителен, его реальность зависит от нашего сознания. Существует некий стандарт разумного и

The Nature of Reality. Modern Review (Calcutta), 1931, XLIX, 42–43.
(Беседа состоялась 14 июля 1930 года на даче Эйнштейна в Капуте под Потсдамом. — *Ред.*)

прекрасного, придающий этому миру достоверность, — стандарт Вечного Человека, чьи ощущения совпадают с нашими ощущениями.

Эйнштейн. Ваш Вечный Человек — это воплощение сущности человека.

Тагор. Да, вечной сущности. Мы должны познавать ее посредством своих эмоций и деятельности. Мы познаем Высшего Человека, не обладающего свойственной нам ограниченностью. Наука занимается рассмотрением того, что не ограничено отдельной личностью, она является вневличным человеческим миром истин. Религия постигает эти истины и устанавливает их связь с нашими более глубокими потребностями; наше индивидуальное осознание истины приобретает общую значимость. Религия наделяет истины ценностью, и мы постигаем истину, ощущая свою гармонию с ней.

Эйнштейн. Но это значит, что истина или прекрасное не являются независимыми от человека.

Тагор. Не являются.

Эйнштейн. Если бы людей вдруг не стало, то Аполлон Бельведерский перестал бы быть прекрасным?

Тагор. Да!

Эйнштейн. Я согласен с подобной концепцией прекрасного, но не могу согласиться с концепцией истины.

Тагор. Почему? Ведь истина познается человеком.

Эйнштейн. Я не могу доказать правильность моей концепции, но это — моя религия.

Тагор. Прекрасное заключено в идеале совершенной гармонии, которая воплощена в универсальном человеке; истина есть совершенное постижение универсального разума. Мы, индивидуумы, приближаемся к истине, совершая мелкие и крупные ошибки, накапливая опыт, просвещая свой разум, ибо каким же еще образом мы познаем истину?

Эйнштейн. Я не могу доказать, что научную истину следует считать истиной, справедливой независимо от человечества, но в этом я твердо убежден. Теорема Пифагора в геометрии устанавливает нечто приблизительно верное, независимо от существования человека. Во всяком случае, если есть реальность, не зависящая от человека, то должна быть истина, отвечающая этой реальности, и отрицание первой влечет за собой отрицание последней.

Тагор. Истина, воплощенная в Универсальном Человеке, по существу должна быть человеческой, ибо в противном случае все, что мы, индивидуумы, могли бы познать, никогда нельзя было бы назвать истиной, по крайней мере научной истиной, к которой мы можем приближаться с помощью логических процессов, иначе говоря, посредством органа

мышления, который является человеческим органом. Согласно индийской философии, существует Брахма, абсолютная истина, которую нельзя постичь разумом отдельного индивидуума или описать словами. Она познается лишь путем полного погружения индивидуума в бесконечность. Такая истина не может принадлежать науке. Природа же той истины, о которой мы говорим, носит внешний характер, т. е. она представляет собой то, что представляется истинным человеческому разуму, и поэтому эта истина — человеческая. Ее можно назвать *Майей*, или иллюзией.

Эйнштейн. В соответствии с Вашей концепцией, которая, может быть, является концепцией индийской философии, мы имеем дело с иллюзией не отдельной личности, а всего человечества в целом.

Тагор. В науке мы подчиняемся дисциплине, отбрасываем все ограничения, налагаемые нашим личным разумом, и таким образом приходим к постижению истины, воплощенной в разуме Универсального Человека.

Эйнштейн. Зависит ли истина от нашего сознания? В этом состоит проблема.

Тагор. То, что мы называем истиной, заключается в рациональной гармонии между субъективным и объективным аспектом реальности, каждый из которых принадлежит Универсальному Человеку.

Эйнштейн. Даже в нашей повседневной жизни мы вынуждены приписывать используемым нами предметам реальность, не зависящую от человека. Мы делаем это для того, чтобы разумным образом установить взаимосвязь между данными наших органов чувств. Например, этот стол останется на своем месте даже в том случае, если в доме никого не будет.

Тагор. Да, стол будет недоступен индивидуальному, но не универсальному разуму. Стол, который воспринимаю я, может быть воспринят разумом того же рода, что и мой.

Эйнштейн. Нашу естественную точку зрения относительно существования истины, не зависящей от человека, нельзя ни объяснить, ни доказать, но в нее верят все, даже первобытные люди. Мы приписываем истине сверхчеловеческую объективность. Эта реальность, не зависящая от нашего существования, нашего опыта, нашего разума, необходима нам, хотя мы и не можем сказать, что она означает.

Тагор. Наука доказала, что стол как твердое тело — это одна лишь видимость и, следовательно, то, что человеческий разум воспринимает как стол, не существовало, если бы не было человеческого разума. В то же время следует признать и то, что элементарная физическая реальность стола представляет собой не что иное, как множество отдельных вращающихся центров электрических сил и, следовательно, также принадлежит человеческому разуму.

В процессе постижения истины происходит извечный конфликт между универсальным человеческим разумом и ограниченным разумом отдельного индивидуума. Непрерывающийся процесс постижения идет в нашей науке, философии, в нашей этике. Во всяком случае, если бы и была какая-нибудь абсолютная истина, не зависящая от человека, то для нас она была бы абсолютно не существующей.

Нетрудно представить себе разум, для которого последовательность событий развивается не в пространстве, а только во времени, подобно последовательности нот в музыке. Для такого разума концепция реальности будет сродни музыкальной реальности, для которой геометрия Пифагора лишена всякого смысла. Существует реальность бумаги, бесконечно далекая от реальности литературы. Для разума моли, поедающей бумагу, литература абсолютно не существует, но для разума человека литература как истина имеет большую ценность, чем сама бумага. Точно так же, если существует какая-нибудь истина, не находящаяся в рациональном или чувственном отношении к человеческому разуму, она будет оставаться ничем до тех пор, пока мы будем существами с разумом человека.

Эйнштейн. В таком случае я более религиозен, чем вы.

Тагор. Моя религия заключается в познании Вечного Человека, Универсального человеческого духа, в моем собственном существе. Она была темой моих гиббертовских лекций, которые я назвал «Религия человека».

1931 г.

Истоки войн

Переписка между Альбертом Эйнштейном и Зигмундом Фрейдом

Эйнштейн — Фрейду

*Капут близ Потсдама,
30 июля 1932 г.*

Дорогой профессор Фрейд!

Предложение Лиги Наций и ее Международного института интеллектуальной кооперации в Париже, состоящее в том, чтобы я пригласил человека, по моему выбору, для искреннего обмена мнениями по любой из проблем, которая меня интересует, дает мне прекрасную возможность обсудить с Вами вопрос, на мой взгляд, наиболее неотложный среди всех других, стоящих перед лицом цивилизации. Эта проблема формулируется так: существует ли для человечества путь, позволяющий избежать опасности войны?

По мере развития современной науки расширяется знание того, что этот трудный вопрос включает в себя жизнь и смерть цивилизации — той, которую мы знаем; тем не менее, все известные попытки решения этой проблемы заканчивались прискорбным фиаско. Более того, я полагаю, что те, кто обязан профессионально решать эту проблему, в действительности лишь все более погружаются в нее, и поэтому заинтересовались теперь непредвзятым мнением людей науки, которые обладают преимуществом точки зрения на проблемы мирового значения в перспективе, возрастающей по мере удаленности от их решения.

Что касается меня, то привычная объектность моих мыслей не позволяет мне проникнуть в темные пространства человеческой воли и чувств. Поэтому в исследовании предложенного вопроса я могу сделать не более чем попытку постановки задачи, для того чтобы создать

Why War? «Open letters» between Einstein & Freud, The New Commonwealth, № 6, 1934.

почву для применения Ваших обширных знаний о людских инстинктах в борьбе с этой проблемой. Существуют психологические барьеры, о существовании которых, люди, не посвященные в науку о мышлении, лишь смутно подозревают. Взаимодействие и капризы ментальных хитросплетений делают их неспособными измерить глубину собственной некомпетентности; убежден, однако, что Вы способны предложить методы из области воспитания и образования, т. е. лежащие более или менее вне сферы политики, которые позволят преодолеть это препятствие.

Что касается меня, то я рассмотрю простейшие соображения, относящиеся к внешнему (административному) аспекту проблемы национального суверенитета: учреждению, опираясь на международный консенсус, законодательного и юридического органа для улаживания любых конфликтов, возникающих между нациями. Каждая нация обязалась бы соблюдать установления этого органа, призывать его для решения всех споров и предпринимать те меры, которые этот трибунал сочтет установить необходимыми для исполнения его декретов. Однако уже здесь я наталкиваюсь на препятствие; трибунал есть человеческое учреждение, и чем меньше его власть оказывается адекватной установленным вердиктам, тем более оно оказывается подверженным уклонению в сторону оказания давления вне области юридического права. Это факт, с которым приходится считаться: закон и сила неизбежно идут рука об руку, и юридические решения настолько приближаются к идеальному правосудию (звучащему как общественное требование), насколько эффективную силу использует общество для воплощения юридического идеала. В настоящее время мы далеки от формирования наднациональной организации, компетентной выносить бесспорно полномочные вердикты и обладающей возможностью абсолютной власти в их претворении в жизнь. Таким образом, я вывожу мою первую аксиому: путь международной безопасности влечет за собой безусловное поражение в правах любой нации, ограничивая определенным образом ее свободу действий и суверенитет, и безусловно ясно, что нет иного пути способного привести к безопасности в обсуждаемом смысле.

Сокрушительные неудачи постигшие все попытки достижения результатов в этой области в течение прошедших десяти лет не оставляют почвы для сомнений, что в действие вступают мощные психологические факторы, которые парализуют любые усилия. Не надо далеко ходить в поисках некоторых из них. Стремление к власти, которое характеризует правящий класс любой нации, враждебно к любому ограничению национального суверенитета. Политика вскармливается интересами торговли или предпринимательства. Я имею в виду вполне

определенную, малочисленную группу индивидов, которые, пренебрегая моралью и ограничениями общества, рассматривают войну как средство продвижения собственных интересов и укрепления их персональной власти.

Признание этого очевидного факта — просто первый шаг к оценке фактического состояния дел. Как следствие, рождается трудный вопрос: как возможно, что эта малая клика подчиняет волю большинства, вынужденного нести потери и страдать в войне, в угоду их персональным амбициям? (Говоря «большинство», я не исключаю вояк любого ранга, выбравших войну своим ремеслом и верящих в то, что они защищают высшие интересы своей расы и что нападение — лучший способ обороны). Обычный ответ на этот вопрос состоит в том, что меньшинство в данный момент является правящим классом, и под его пятой — пресса и школы, а чаще всего и церковь. Именно это позволяет меньшинству организовать и направить эмоции масс, превратить их в инструмент своей воли.

Однако даже этот ответ не ведет к решению. Из него рождается новый вопрос: почему человек позволяет довести себя до столь дикого энтузиазма, заставляющего его жертвовать собственной жизнью? Возможен только один ответ: потому что жажда ненависти и разрушения находится в самом человеке. В спокойные времена это устремление существует в скрытой форме и проявляется только при неординарных обстоятельствах. Однако оказывается сравнительно легко вступить с ним в игру и раздуть его до мощи коллективного психоза. Именно в этом, видимо, заключается скрытая сущность всего комплекса рассматриваемых факторов, загадка, которую может решить только эксперт в области человеческих инстинктов.

Таким образом, мы подошли к последнему вопросу. Возможно ли контролировать ментальную эволюцию рода человеческого таким образом, чтобы сделать его устойчивым против психозов жестокости и разрушения? Здесь я имею в виду не только так называемые необразованные массы. Опыт показывает, что чаще именно так называемая интеллигенция склонна воспринимать это губительное коллективное внушение, поскольку интеллект не имеет прямого контакта с «грубой» действительностью, но встречается с ее спиритуалистической, искусственной формой на страницах печати.

Итак: пока я говорил только о войнах между нациями, которые известны как международные конфликты. Но я хорошо знаю, что агрессивный инстинкт работает и в других формах и обстоятельствах. (Я имею в виду гражданские войны, причина которых прежде была в религиозном рвении, а ныне — в социальных факторах; или преследования на расовой почве.) Я умышленно привлекаю внимание к тому, что

является наиболее типичной, мучительной и извращенной формой конфликта человека с человеком, для того чтобы мы имели наилучшую возможность для обнаружения путей и средств, делающих невозможными любые вооруженные конфликты.

Я знаю, что в Ваших трудах мы можем найти, явно или намеком, пояснения ко всем проявлениям этой срочной и захватывающей проблемы. Однако Вы сделаете огромную услугу нам всем, если представите проблему всемирного замирения в свете Ваших последних исследований, и тогда, быть может, свет истины озарит путь для новых и плодотворных способов действий.

Искренне Ваш,
А. Эйнштейн

Фрейд — Эйнштейну

*Вена,
сентябрь 1932 г.*

Дорогой г-н Эйнштейн!

Когда я узнал о Вашем намерении пригласить меня обменяться мыслями на тему, вызывающую интерес у Вас и заслуживающую, возможно, внимания общественности, я охотно согласился. Я ожидал, что Вы выберете пограничную проблему, которая каждому из нас — физику или психологу — позволит в конце концов встретиться на общей почве, пройдя различными путями и используя различные предпосылки. Однако вопрос, который Вы адресовали мне — что необходимо сделать для освобождения человечества от угрозы войны? — оказался для меня сюрпризом. Кроме того, я был буквально ошеломлен мыслью о моей (чуть было не написал — нашей) некомпетентности; для ответа мне надо бы было стать чем-то вроде практического политика, сравнившись в образовании с государственным мужем. Однако потом я осознал, что Вы обращаетесь не к ученым или физикам Вашего уровня, а говорите, как любящий о своей второй половине, — о тех людях, что, откликнувшись на призыв Лиги Наций и полярника Фритьофа Нансена, решили посвятить себя задаче помощи бездомным и голодающим жертвам мировой войны. Я напомнил себе, что меня не просят давать конкретные рекомендации, а скорее просят объяснить, как может ответить психолог на вопрос о возможности предупреждения войн.

Формулируя в своем письме постановку задачи, Вы отбираете ветер у моих парусов! Однако я рад следовать за Вами и заняться

подтверждением Ваших заключений. Я сделаю все от меня зависящее, чтобы, по возможности, расширить их моим пониманием или моими гипотезами.

Вы начинаете с отношения между властью и правом, и это, несомненно, правильная система координат для наших исследований. Но термин «власть» я буду замещать и совмещать с более употребительным словом — «насилие».

Право и насилие для нас сегодня представляются противоположностями. Легко показать, однако, что одно развилось из другого; рассматривая вопрос с самого начала, достаточно легко прийти к решению проблемы. Я прошу прощения, если в том, что я буду упоминать в дальнейшем как общеизвестные и доступные факты, появится ряд новых данных, однако контекст требует именно такого метода изложения.

Конфликт интересов между людьми в принципе решается посредством насилия. В этом человек не изобрел ничего нового, то же самое происходит и в мире животных. Однако вдобавок у людей появились конфликты мнений, каковые могут достигать наивысших вершин абстракции и, видимо, требуют иной техники разрешения. Эти тонкости появляются не сами по себе, но есть результат скрытого развития. Вначале грубая сила была фактором, который в малых сообществах решал вопрос о собственности и лидерстве. Однако очень скоро физическая сила была потеснена и замещена использованием различных орудий; они делали победителем того, чье оружие лучше или кто более умел в его изготовлении. Вхождение в обиход оружия впервые позволило умственным способностям возобладать над грубой силой, но суть конфликта не изменилась: ослабев от ущерба, одна из конфликтующих сторон-партий оказывается перед нехитрым выбором — отказаться от своих притязаний или быть уничтоженной. Наиболее эффективно такое завершение конфликта, при котором противник полностью выведен из строя — другими словами, убит. Эта процедура имеет два преимущества: во-первых, враг не может возобновить военные действия и, во-вторых, его судьба является сдерживающим примером для остальных. Кроме того, кровопролитие удовлетворяет некоторую инстинктивную страсть — к этому положению мы еще вернемся.

Однако есть аргументы и против убийства: возможность использования врага как раба — если дух его будет сломлен, ему можно оставить жизнь. В этом случае насилие находит выход не в резне, а в покорении. Здесь истоки практики пощады; однако победитель с этого времени вынужден считаться с жадной мести, терзающей его жертву, создающей угрозу его персональной безопасности.

Таким образом, в примитивных сообществах жизнь протекает в условиях господства силы: насилие осуществляет власть над всем сущим, используя жестокость, будь то жестокость природы или армии.

Известно, что это положение вещей изменялось в процессе эволюции, и был пройден путь от насилия к праву. Однако каков этот путь? Мне кажется, один-единственный. Он вел к такому положению дел, что большую силу одного смогло компенсировать объединение слабейших, к убеждению, что «силу можно одолеть всем миром». Мощь объединения разрозненных дотоле одиночек делает их вправе противостоять отдельному гиганту. Таким образом, мы можем дать определение «права» (в смысле закона), используя представление о власти сообщества. Однако это по-прежнему насилие, незамедлительно применяемое к любому одиночке, противопоставляющему себя сообществу. Насилие, использующее те же методы для достижения своих целей, хотя насилие общественное, а не индивидуальное. Однако для перехода от грубой силы к царству законности должны произойти определенные изменения в психологии. Союз большинства должен быть прочным и стабильным. Если это основное условие будет нарушено каким-либо выскочкой, то до тех пор пока выскочка не будет поставлен на место, положение вещей не будет меняться. Другой человек, завороченный превосходством его власти, пойдет по его стопам, вверяя себя вере в насилие, — и цикл повторится бесконечно. Противопоставить этому порочному кругу борьбы за власть можно только постоянный союз людей, который должен быть очень хорошо организован; залог успеха — в создании индустрии для претворения в жизнь свода правил-законов, которая применяла бы насилие таким образом, чтобы все законные решения неукоснительно исполнялись. Распознавание возмутителей спокойствия среди членов группы, связанной чувствами единства и братской солидарности, лежит в основе реальной силы и эффективности общины.

В этом состоит то, что представляется мне ядром проблемы: по мере превращения произвола насилия в силу великого объединения людей, основанного на сообществе чувств, формируется общность чувств, скрепляющих членов общины сетью связей. Далее мне остается лишь шлифовать это утверждение. Все достаточно просто, пока сообщество состоит из множества равнозначных индивидов. Законы общины гарантируют общую безопасность, требуя взамен ограничение персональной свободы и отказ от использования личной силы. Но это только умозрительная возможность; практически ситуация всегда усложняется фактом того, что неравенство существует изначально в делении людей на группы, например, на мужчин и женщин, отцов и детей; в результате

войн и завоевательных походов всегда появляются победители и побежденные и, соответственно, владельцы и рабы. С тех самых пор общинные законы претерпевают трансформацию, отражающую фактическое неравенство, закрепляя положение дел, при котором рабские классы наделяются меньшим количеством прав. В этом положении дел заложены два фактора, определяющие как неустойчивость существующего правопорядка, так и возможность его эволюции: во-первых, это попытки правящего класса подняться над ограничениями закона и, во-вторых, постоянная борьба угнетенных за свои права. Последние борются за ликвидацию юридического неравенства, воплощенного в кодексах, и замену его законами, одинаковыми для всех. Вторая из этих тенденций особенно важна, когда происходят изменения к лучшему, связанные с изменением расстановки сил в пределах сообщества. В этом случае законы постепенно приходят в соответствие с изменившимся раскладом сил, если обычное нежелание правящего класса принимать новые реалии не приводит к восстаниям и гражданским войнам. В моменты восстаний, когда закон временно бездействует, избежать насильственного разрешения конфликтов интересов в обществе невозможно, и сила вновь становится арбитром соревнования, ведущего к установлению обновленного законодательного режима. В то же время существует и другой фактор, позволяющий менять общественное устройство мирным способом, заключенный в области культурной эволюции общественных масс; однако этот фактор имеет иной порядок и будет рассмотрен отдельно.

Таким образом, мы видим, что даже в пределах группы людей конфликт интересов делает неизбежным применение насилия. Повседневные нужды и общие заботы, проистекающие из совместной жизни, способствуют быстрому решению таких конфликтов, причем варианты мирных решений определенным образом совершенствуются. Однако достаточно одного взгляда на мировую историю, чтобы увидеть бесконечный ряд конфликтов одного общества с другим (или многими другими), конфликтов между большими и малыми общностями — городами, провинциями, племенами, народами, империями — которые почти всегда решались пробой сил в войне. Побежденные в таких войнах пожинают плоды конквисты и мародерства. Невозможно дать однозначную трактовку нарастающим масштабам этих войн. Одни из них (например, завоевания монголов и турок) не приносили ничего, кроме бедствий. Другие, напротив, приводили к превращению насилия в право — в пределах объединенных в войне земель исключалась возможность обращения к насилию, а новый правопорядок сглаживал конфликты. Так, завоевания римлян одарили Средиземноморье римским правом — рах гомана. Страсть французских королей к величию создала новую

Францию, исповедующую мир и единство. Как бы парадоксально это ни звучало, необходимо признать, что война была не самым негодным средством для установления желанного «нерушимого» мира, поскольку рождала громадные империи, в пределах которых сильная центральная власть ограничивала все поползновения к стычкам. Практически, конечно, мир не был достигнут, громадные империи возникали и вновь распадались, поскольку не могли достичь реального единства частей, насильственно связанных.

Более того, все известные до сих пор империи, как бы они ни были велики, имели определенные границы и для выяснения отношений друг с другом прибегали к помощи армий. Единственным значимым результатом всех военных усилий стало лишь то, что человечество поменяло бесчисленные, беспрестанные малые войны на более редкие, но и более опустошительные великие войны.

Все сказанное можно отнести и к современному миру, и Вы пришли к этому заключению кратчайшим путем. Единственный и основной путь для окончания войн заключается в том, чтобы создать центральный контроль, который при всеобщем согласии должен играть решающую роль в любом конфликте интересов. Для этого необходимы две вещи: во-первых, создание верховного суда, во-вторых, наделение его адекватной исполнительной силой. Первое требование бесполезно до тех пор, пока не выполнено второе. Очевидно, что Лига Наций, являясь верховным судом в указанном смысле, удовлетворяет первому требованию, однако не удовлетворяет второму. Эта конструкция не располагает силой по определению и сможет набрать ее лишь в том случае, если эту силу предоставят члены нового объединения наций. Но положение дел таково, что рассчитывать на это не придется. Обращаясь к Лиге Наций, необходимо отметить всю уникальность этого эксперимента, по всей видимости, никогда не имевшего места в истории в таком масштабе. Это — попытка обзавестись международной верховной властью (другими словами — реальным воздействием), которая до сих пор не может воплотиться в жизнь, что можно интерпретировать в рамках общего идеализма, свойственного плодам рассудка.

Мы говорили, что общество связано воедино двумя факторами: насильственным принуждением и общинными связями (групповыми идентификациями — если использовать специальные термины). При отсутствии одного из факторов, другой способен удерживать единство группы. Эта точка зрения работает только в том случае, когда существует глубинное чувство общности, разделяемое всеми. Следовательно, требуется единая мера эффективности таких чувств. История говорит нам, что в некоторых условиях чувства были вполне действенны.

Например, концепция панэллинизма как отражение ощущения пребывания во враждебном варварском окружении выражалась в амфиктионах (религиозно-политических союзах), институте оракулов и олимпийских играх. Эта концепция оказалась вполне достаточной как метод гуманизации конфликтов внутри расы эллинов, и в своем стремлении поразить врага эллинские города и их союзы даже избегли соблазна коалиций со своими расовыми врагами — персами. Солидарность христианского мира, больших и малых наций в эпоху Возрождения была как нельзя более эффективным препятствием против тотальной деспотии — заветной цели султана. В наше время мы тщетно оглядываемся в поисках идеи, приоритет которой оказался бы бесспорным. Ясно, что националистические идеи, главенствующие сегодня в любой стране, работают в совершенно ином направлении. Некоторые из тех, кто лелеет надежду, что концепции большевиков могут покончить с войнами, забывают, возможно, о реальном положении дел, при котором эта цель достижима лишь по окончании периода жесточайшего международного противостояния. Представляется, что любые попытки заменить грубую силу властью идеалов в современных условиях фатально обречены на провал. Нелогично игнорировать тот факт, что право изначально было грубым насилием, и до сего дня оно не может обойтись без помощи насилия.

Теперь я могу прокомментировать и другое Ваше суждение. Вы поражены, что людей столь легко инфицировать военной лихорадкой, и полагаете, что за этим должно стоять нечто реальное — инстинкт ненависти и уничтожения, заложенный в самом человеке, которым манипулируют подстрекатели войны. Я полностью согласен с Вами. Я верю в существование этого инстинкта и совсем недавно с болью наблюдал его оголтелые проявления. В этой связи я могу изложить фрагмент того знания инстинктов, которым сегодня руководствуются психоаналитики, после долгих предварительных рассуждений и блужданий во тьме.

Мы полагаем, что человеческие влечения бывают только двух родов. Во-первых, те, что направлены на сохранение и объединение; мы называем их эротическими (в том смысле, в каком Эрос понимается в платоновском «Пире»), или сексуальными влечениями, сознательно расширяя известное понятие «сексуальность». Во-вторых, другие, направленные на разрушение и убийство: мы классифицируем их как инстинкты агрессии или деструктивности. Как Вы понимаете, это известные противоположности — любовь и ненависть, — преобразованные в теоретические объекты; они образуют аспект тех вечных полярностей, притяжения и отталкивания, которые присутствуют и в пределах Вашей профессии. Однако мы дол-

жны быть крайне осторожны при рассмотрении понятий добра и зла. Каждый из этих инстинктов не существует без своей противоположности, и все явления жизни происходят от их деятельности, работают ли они в согласии или в оппозиции. Инстинкт любой категории практически никогда не работает отдельно; он всегда смешивается («сплавляется», как мы говорим) с некоторой дозой его противоположности, что способно изменить его направленность, а в некоторых обстоятельствах препятствует достижению конечной цели. Так, самосохранение имеет, несомненно, эротическую природу, но, судя по конечному результату, это тот самый инстинкт, который вынуждает к агрессивным действиям. Таким же образом инстинкт любви, будучи направлен на определенный объект, жадно впитывает примеси другого инстинкта, если это повышает эффективность овладения целью. Трудность изоляции двух видов инстинкта в их проявлениях долго не позволяла нам распознать их.

Если Вы согласитесь пройти вместе со мной несколько дальше в этом направлении, то обнаружите, что человеческие отношения дополнительно осложняются и другим обстоятельством. Только в исключительных случаях некоторое действие стимулируется действием единственного инстинкта, который сам по себе является смесью Эроса и деструктивного начала. Как правило же, взаимодействуют несколько вариантов сплавов, образованных инстинктами, вызывая к жизни тот или иной акт. Этот факт был должным образом отмечен Вашим коллегой — профессором физики из Геттингена Г.С. Лихтенбергом; возможно даже, он более был выдающимся физиологом, чем физиком. Развивая понятие «карт мотивации», он писал следующее: «...эффективные поводы, побуждающие человека к действию, могут классифицироваться, подобно 32 градациям направления ветра, и могут быть описаны в той же самой манере как зюйд-зюйд-ост, например: «пища—пища—слава» или «слава—слава—пища». Таким образом, целая гамма человеческих побуждений может стать поводом для вовлечения нации в войну; для этого используется мотивация высоких и низких побуждений, причем как явных, так и не артикулированных. Среди этих побуждений жажда агрессии и разрушения, несомненно, присутствует; ее распространенность и силу подтверждают неисчислимые жестокости истории и повседневная жизнь человека. Стимуляция разрушительных импульсов путем обращения к идеализму и эротическому инстинкту, естественно, содействует их высвобождению. Размышляя относительно злодеяний, зарегистрированных на страницах истории, мы чувствуем, что идеальный повод часто служил камуфляжем для жажды разрушения. Иногда, как в случае с ужасами Инквизиции, кажется, что идеальные побуждения, овладевающие рассудком, черпают свою в силу в безрассудстве разрушительных

инстинктов. Можно интерпретировать так или иначе, но суть дела не меняется.

Я понимаю, что Вы интересовались предотвращением войны, а не нашими теориями. Однако позвольте мне все же задержаться на разрушительном инстинкте, которому редко уделяют внимание, отвечаящее его значимости. Этот инстинкт, без преувеличения, действует повсеместно, приводя к разрушениям и стремясь низвести жизнь до уровня косной материи. Со всею серьезностью он заслуживает названия инстинкта смерти, в то время как эротические влечения представляют собой борьбу за жизнь. Направляясь на внешние цели, инстинкт смерти проявляется в виде инстинкта разрушения. Живое существо сохраняет свою собственную жизнь, разрушая чужую. В некоторых своих проявлениях инстинкт смерти действует внутри живых существ, и нами прослежено достаточно большое число нормальных и патологических явлений такого обращения разрушительных инстинктов. Мы даже впали в такую ересь, что стали объяснять происхождение нашей совести подобным «обращением» внутрь агрессивных импульсов. Как Вы понимаете, если этот внутренний процесс начинает разрастаться, это поистине ужасно, и потому перенесение разрушительных импульсов во внешний мир должно приносить эффект облегчения. Таким образом, мы приходим к биологическому оправданию всех мерзких, пагубных наклонностей, с которыми мы ведем неустанную борьбу. Собственно, остается резюмировать, что они даже более в природе вещей, чем наша борьба с ними.

Все сказанное может создать у Вас впечатление, что наши теории образуют мифологическую и сумрачную область! Но не ведет ли всякая попытка изучения природы в конечном счете к этому — к своего рода мифологии? Иначе ли обстоит дело в физике?

Наш умозрительный анализ позволяет с уверенностью утверждать, что нет возможности подавить агрессивные устремления человечества. Говорят, что в тех счастливых уголках земли, где природа дарует человеку свои плоды в изобилии, жизнь народов протекает в неге, не зная принуждения и агрессии. Мне тяжело в это поверить, и далее мы рассмотрим жизнь этого счастливого народа подробнее. Большевики также стремятся покончить с человеческой агрессивностью, гарантируя удовлетворение материальных потребностей и предписывая равенство между людьми. Я полагаю, что эти упования обречены на провал. Между прочим, большевики деловито усовершенствуют свои вооружения, и их ненависть к тем, кто не с ними, играет далеко не последнюю роль в их единении. Таким образом, как и в Вашей постановке задачи, подавление человеческой агрессивности не стоит на

повестке дня; единственное, на что мы способны, — попытаться выпустить пар другим путем, избегая военных столкновений.

Из нашей «мифологии инстинктов» мы можем легко вывести формулу косвенного метода устранения войны. Если склонность к войне вызывается инстинктом разрушения, то всегда рядом есть его контр-агент, Эрос. Все, что продуцирует чувства общности между людьми, является противоядием против войн. Эта общность может быть двух сортов. Первое — это такая связь, как притяжение к объекту вождления, проявляющаяся как сексуальное влечение. Психологи не стесняются называть это любовью. Религия использует тот же язык: «Возлюби ближнего своего, как самого себя». Это набожное суждение легко произнести, да только трудно выполнить. Вторая возможность достижения общности — посредством идентификации. Все, что подчеркивает сходство интересов людей, дает возможность проявиться чувству общности, идентичности, на котором, по большому счету, и основано все здание человеческого общества.

В Вашей резкой критике злоупотреблений властью я усматриваю еще одно предложение, как нанести удар по истокам войны. Одной из форм проявления врожденного и неустранимого неравенства людей является разделение на ведущих и ведомых, причем последних — подавляющее большинство. Это большинство нуждается в указании свыше, чтобы принять решение, которое без колебаний принимается к исполнению. Отметим, что человечеству предстоит еще много выстрадать, прежде чем родится класс независимых мыслителей, не поддающихся запугиванию, стремящихся к истине людей, миссия которых будет состоять в том, чтобы своим примером указывать дорогу массам. Нет необходимости заострять внимание на том, сколь мало политические или церковные ограничения на свободу мысли поощряют идею переустройства мира. Идеальным состоянием для общества является, очевидно, ситуация, когда каждый человек подчиняет свои инстинкты диктату разума. Ничто иное не может повлечь столь полного и столь длительного союза между людьми, даже если это образует прорехи в сети взаимной общности чувств. Однако природа вещей такова, что это не более чем утопия. Другие косвенные методы предотвращения войны, конечно, более выполнимы, но не могут повлечь за собой быстрых результатов. Они более напоминают мельницу, которая мелет столь медленно, что люди скорее умрут от голода, чем дождутся ее помола.

Как Вы видите, консультации с теоретиком, живущим вдали от мирских контактов, насчет практических и срочных проблем не прибавляют оптимизма. Лучше заниматься каждым из возникающих кризисов теми средствами, которые имеются в наличии.

Однако мне хотелось бы обратиться к вопросу, который меня тем более интересует, что он не был затронут в Вашем письме. Почему Вы и я, как и многие другие, столь неистово протестуют против войн, вместо того чтобы признать их адекватной противоположностью неумности жизни? Представляется, что это замечание достаточно естественно звучит и в биологическом смысле, а также с неизбежностью следует из практики. Я полагаю, что Вы не будете шокированы такой постановкой вопроса. Для лучшего проникновения в суть вопроса спрячемся за маской притворной отчужденности. Ответить на мой вопрос можно следующим образом. Каждый человек обладает возможностью превзойти самого себя, тогда как война отнимает жизнь вместе с надеждой; стремление к сохранению человеческого достоинства способно принудить одного человека убить другого, и следствием этого является крушение не только того, что добыто тяжким физическим трудом, но и многого другого.

Кроме того, современные способы ведения войны почти не оставляют места проявлениям истинного героизма, и могут привести к полному истреблению одной или обеих воюющих сторон, учитывая высокое совершенство современных методов уничтожения. Это справедливо в той же мере, в какой очевидно, что мы не можем запретить войны всеобщим договором.

Несомненно, что любое из утверждений, которые я сделал, может быть подвергнуто сомнению. Можно спросить, например, почему общество, в свою очередь, не должно притязать на жизни своих членов? Более того, все формы войны невозможно осудить без разбора; до тех пор пока есть нации и империи, беззастенчиво готовящиеся к истребительным войнам, все должны быть оснащены в той же степени для ведения войны. Но мы не будем сосредотачиваться на этих вопросах, поскольку они лежат вне круга проблем, к обсуждению которых Вы меня пригласили.

Я перехожу к другому пункту, базирующемуся, насколько я понимаю, на нашей общей ненависти к войне. Дело в том, что мы не можем без ненависти. Мы не можем иначе, ибо такова наша органическая природа, хоть мы и пацифисты. Найти аргументы для обоснования этой точки зрения не составит труда, однако без объяснения это не слишком понятно.

Я вижу это следующим образом. С незапамятных времен длится процесс культурного развития человечества (некоторые, насколько мне известно, предпочитают именовать его цивилизацией). Этому процессу мы обязаны всем лучшим в том, какими мы стали, равно как и значительной частью того, от чего мы страдаем. Природа и причины этой эволюции неясны, ее задачи размыты неопределенностью, однако некоторые из ее

характеристик легко почувствовать. Вполне вероятно, что он может привести человечество к вымиранию, ибо наносит ущерб сексуальной функции — уже сегодня некультурные расы и отсталые слои населения размножаются быстрее, чем развитые и высококультурные. Возможно сопоставление этого процесса с результатами одомашнивания некоторых пород животных, несомненно, вызывающего изменения в их физическом строении. Однако представление, что культурное развитие общества является процессом того же порядка, пока не стало общепринятым. Что же касается психических изменений, которые сопровождают культурный процесс, то они поразительны и их невозможно отрицать. Установлено, что они заключаются в прогрессирующем отказе от завершенного инстинктивного действия и ограничении масштаба инстинктивного отклика. Сенсации наших прадедов для нас — пустой звук или же невыносимо скучны, и если наши этические и эстетические идеалы претерпели изменение, то причиной тому — не что иное как органические изменения. С психологической стороны мы имеем дело с двумя важнейшими феноменами культуры, первый из которых — формирование интеллекта, подчиняющего себе инстинкты, и второй — замыкание агрессии внутри себя, со всеми вытекающими из этого выгодами и опасностями. Сегодня война приходит во все более решительное противоречие с ограничениями, налагаемыми на нас ростом культуры; наше негодование объясняется нашей несовместимостью с войной. Для пацифистов, подобных нам, это не просто интеллектуальное и эмоциональное отвращение, но внутренняя нетерпимость, идиосинкразия в ее наиболее выраженной форме. В этом отрицании эстетическое неприятие низости военного способа действий даже перевешивает отвращение к конкретным военным злодеяниям.

Как долго придется ждать, чтобы все люди стали пацифистами? Ответ неизвестен, но, возможно, не так уж фантастичны наши предположения о том, что эти два фактора — предрасположенность человека к культуре и вполне обоснованный страх перед будущим, заполоненным войнами, способны в обозримом будущем положить конец войне. К сожалению, мы не в состоянии угадать магистраль или даже тропу, ведущую к этой цели. Не умаляя точности суждения, можно лишь сказать, что все то, что в той или иной форме сделано для развития культуры, работает против войны.

Ваш Зигмунд Фрейд

Сократовский диалог

Мэрфи. Вместе с нашим другом Планком я принимал участие в написании книги, посвященной главным образом проблеме причинности и свободы человеческой воли.

Эйнштейн. Честно говоря, я не понимаю, что имеют в виду, когда говорят о свободе воли. Например, я чувствую, что мне хочется то или иное, но я совершенно не понимаю, какое отношение это имеет к свободе воли. Я чувствую, что хочу закурить трубку, и закуриваю ее. Но каким образом я могу связать это действие с идеей свободы? Что кроется за актом желания закурить трубку? Другой акт желания? Шопенгауэр как-то сказал: «Человек может делать то, что хочет, но не может хотеть по своему желанию».

Мэрфи. Но сейчас в физике модно приписывать нечто вроде воли даже обычным процессам, происходящим в неорганической природе.

Эйнштейн. То, о чем Вы говорите, не просто лишено смысла. Это бессмыслица, с которой нужно всячески бороться.

Мэрфи. Ученые называют это индетерминизмом.

Эйнштейн. Индетерминизм — понятие совершенно нелогичное. Что они подразумевают под индетерминизмом? Если я скажу, что средняя продолжительность жизни какого-то радиоактивного атома равна такой-то величине, то это утверждение будет выражать некоторую закономерность. Но сама по себе эта идея не содержит идеи причинности. Эту закономерность мы называем законом средних величин, но не всякий такой закон должен иметь некий причинный смысл. В то же время, если я скажу, что средняя продолжительность жизни такого атома индетерминирована в том смысле, что она причинно не обусловлена, то я выскажу бессмысленное утверждение. Я могу сказать, что мы встретимся с Вами завтра в

Epilogue. A Socratic Dialogue. В кн.: *Planck M. Where is science going?* London, 1933, 210–221. (Мэрфи — ирландский писатель. — *Ред.*)

некоторый неопределенный момент времени. Но это вовсе не означает, что этот момент времени недетерминирован. Приду я или не приду, этот момент времени наступит. Здесь мы сталкиваемся с вопросом смешения субъективного мира и мира объективного. Индетерминизм квантовой физики — это субъективный индетерминизм. Его необходимо связать с чем-то, ибо в противном случае индетерминизм не имеет смысла. В случае квантовой механики индетерминизм связан с нашей неспособностью следить за отдельными атомами и предсказывать их поведение. Утверждение, что время прибытия какого-то поезда в Берлин индетерминировано, бессмысленно, если не указывать, по отношению к чему оно индетерминировано. Если поезд вообще прибывает в Берлин, то чем-то момент его прибытия детерминирован. То же относится и к атомам.

Мэрфи. В каком смысле Вы применяете понятие детерминизма к природе? В том смысле, что всякое событие в природе обусловлено другим событием, которое мы называем его причиной?

Эйнштейн. Мне бы не хотелось ставить вопрос таким образом. Прежде всего я считаю, что многие недоразумения, с которыми приходится сталкиваться во всех проблемах, связанных с причинностью, проистекают из того, что вплоть до самого последнего времени было модно приводить принцип причинности лишь в его зачаточной формулировке. Когда Аристотель и схоласты дали определение того, что они понимают под причиной, идея объективного эксперимента в научном смысле еще не возникла. Поэтому они занимались тем, что давали определение метафизической концепции причины. То же относится и к Канту. Ньютон, по-видимому, осознал, что такая донаучная формулировка принципа причинности может оказаться недостаточной для современной ему физики. И Ньютон вынужден был заняться описанием тех законов, которые управляют событиями, происходящими в природе, и положить в основу своего синтеза математические законы. Я убежден, что события, происходящие в природе, подчиняются какому-то закону, связывающему их гораздо более точно и более тесно, чем мы подозреваем сегодня, когда говорим, что одно событие является причиной другого. Ведь в этом случае наша концепция ограничивается лишь тем, что происходит в один отрезок времени. То, что при этом происходит, выявляется из всего процесса в целом. Метод, к которому мы прибегаем в настоящее время, пользуясь принципом причинности, весьма груб и поверхностен. Мы ведем себя, как ребенок, который по одному стиху судит о целой поэме, ничего не зная о ее ритмическом рисунке, или как человек, начинающий учиться игре на фортепьяно и способный улавливать лишь связь какой-ни-

будь одной ноты с непосредственно ей предшествовавшей или следующей за ней. В какой-то мере такой подход может оказаться вполне удовлетворительным (если иметь дело с очень простыми и незамысловатыми сочинениями), но такого подхода явно недостаточно для интерпретации фуг Баха. Квантовая физика привела нас к рассмотрению очень сложных процессов, и чтобы эта задача оказалась нам по плечу, мы должны расширить и уточнить нашу концепцию причинности.

Мэрфи. Это будет трудным делом, ибо Вам придется заняться отнюдь не модным вопросом. Если позволите, я произнесу небольшую речь. Я буду говорить не потому, что мне приятно слушать самого себя, хотя, разумеется, и это обстоятельство играет не последнюю роль. (Какой же ирландец не любит слушать самого себя?) Мне хотелось бы узнать Вашу реакцию на мое выступление.

Эйнштейн. Разумеется, я Вас слушаю.

Мэрфи. Судьба, или предопределение, составляет основу греческой драмы. А драма в то время была лишь подчиненным строгим канонам выражением сознания, глубоко иррационально воспринимающего действительность. В греческой драме действующие лица не просто рассуждали, как в пьесах Шоу. Вспомните трагедию Атрея, где судьба, или неизбежная цепь причин и следствий, является той единственной нитью, на которой держится вся драма.

Эйнштейн. Судьба, или предопределение, и принцип причинности — это не одно и то же.

Мэрфи. Я знаю. Но ученые живут в том же мире, что и остальные люди. Некоторые из ученых посещают политические митинги и ходят в театр, и большинство из тех, кого я знаю, по крайней мере здесь, в Германии, следят за литературой. Они не могут избежать влияния той *среды*, в которой живут. А *среда* в настоящее время в основном характеризуется борьбой за избавление от причинных цепей, опутавших мир.

Эйнштейн. Но разве человечество не всегда боролось за избавление от причинных цепей?

Мэрфи. Всегда, но не до такой степени, как сейчас. Во всяком случае, я сомневаюсь, чтобы политический деятель мог всегда взвесить последствия той причинной цепи событий, которую он приводит в действие по собственной глупости. Сам он весьма ловок и сумеет вовремя выскользнуть. Макбет не был политиком, и именно поэтому он и потерпел поражение. Он понимал, что убийство не сможет предотвратить последствий. Но он не думал о том, как вырваться из оков последствий, до тех пор, пока не было уже слишком поздно, и все лишь потому, что он не был политиком. Я считаю, что в настоящее время

люди начинают сознавать неизбежность неумолимой последовательности событий. Они начинают понимать то, что им давно говорил Бернард Шоу в своей пьесе «Цезарь и Клеопатра» (разумеется, это говорилось им и раньше бесчисленное число раз). Вы помните слова Цезаря, обращенные к царице Египта после того, как по ее приказу был убит Фотин, хотя Цезарь гарантировал тому безопасность.

«Ты слышишь? — сказал Цезарь. — Те, что ломаются сейчас в ворота твоего дворца, и они тоже верят в отмщенье и убийство. Ты убила их вождя, и они будут правы, если убьют тебя. Если ты не веришь, спроси этих твоих четырех советчиков. А тогда, во имя того же права, разве я не должен буду убить их за то, что они убили свою царицу, и быть убитым в свою очередь их соотечественниками за то, что я вторгся в отчизну их? И что же тогда останется Риму, как не убить этих убийц, чтобы мир увидал, как Рим мстит за сынов своих и за честь свою? И так до скончания века — убийство будет порождать убийство, и всегда во имя права и чести и мира, пока боги не устанут от крови и не создадут породу людей, которые научатся понимать».*

Люди в настоящее время начинают постигать эту ужасную истину не потому, что они осознают принцип «кровь за кровь», а лишь потому, что видят: грабя своего соседа, вы грабите самого себя. И так же, как осуществляется принцип «кровь за кровь», осуществляется и принцип «грабеж за грабеж». Так называемые победители в мировых войнах грабили побежденных. Теперь же они знают, что, грабя побежденных, они грабят самих себя. Потому-то теперь и наступило состояние всеобщей нищеты. Многие теперь стали понимать это, но они не имеют мужества смотреть правде в глаза и, подобно Макбету, прибегают к гаданию. Макбету гадали ведьмы, у которых был волшебный котел. В этом случае, к сожалению, наука является одним из ингредиентов, брошенных в этот котел, чтобы дать людям желанную панацею. Вместо того чтобы смело признать существующий беспорядок, трагедии, преступления, каждый стремится доказать свою невиновность и найти алиби, позволяющее уйти от ответственности за последствия собственных деяний. Взгляните на вереницу голодных, которые каждый день приходят к вашей двери, моля о куске хлеба. Это люди в полном расцвете сил, жаждущие использовать право человека на труд. Вы можете увидеть их на улицах Лондона, их грудь украшает медаль за храбрость, но они вынуждены просить кусок хлеба. То же самое происходит и в Нью-Йорке, и в Чикаго, и в Риме, и в Турине. Тот, кто с удобством устроился в мягком кресле, говорит: «Нас это не касается». И говорит это потому, что знает, что его это как раз касается.

* Цит. по: *Бернард Шоу. Избранные произведения в двух томах.* Т. I. ГИХЛ, 1956, 463–464. — *Прим. ред.*

Затем он берет популярные книжки по физике и с удовлетворением вздыхает, когда ему говорят, что такой вещи, как закон причинности, не существует.

Что же нужно? Ведь это Наука, а Наука в настоящее время — двойник религии. Именно буржуа, столь высоко ценящий личный комфорт, способствовал созданию институтов и лабораторий. И что бы Вы ни говорили, ученые не были бы людьми, если бы не разделяли этих воззрений, хотя бы и подсознательно.

Эйнштейн. Ну, так говорить нельзя.

Мэрфи. Почему же? Вполне возможно. Вспомните о корыстолюбцах в Вами же самим нарисованной картине храма науки, а ведь они создали большую его часть. Вы же сами признали, что заслужить расположение ангела смогли бы лишь немногие. Я склонен думать, что та борьба, которая происходит в современной науке, представляет собой попытку не допустить обычный здравый смысл в разработанные ею схемы мышления. Это очень напоминает ту борьбу, которую когда-то вели теологи. Однако в эпоху Возрождения они уступили велению времени и ввели в свою науку чуждые ей идеи и методы, которые в конце концов и привели к кризису теологии.

Упадок схоластики начался с того времени, когда вокруг философов и теологов стали разгораться страсти толпы. Вспомните, какую давку устроили профаны, слушая Абельяра в Париже, а ведь ясно, что они не могли понять оригинальности его суждений. Лесть толпы в гораздо большей степени послужила причиной его падения, чем чьи-либо происки. Он не был бы человеком, если бы сам не стал думать о своей науке, и он действительно поддался этому искушению. Я не уверен в том, что и в настоящее время многие ученые не находятся в его положении. Некоторые из сотканных ими блестящих хитросплетений напоминают софистические ухищрения времен упадка схоластики.

Древние философы и теологи знали об этой опасности и предпринимали попытки предотвратить ее. Они создали корпорации ученых, доступ в которые был открыт лишь для посвященных. В настоящее время мы наблюдаем те же меры предосторожности и в других областях культуры. Католическая церковь мудро сохраняет внешнюю сторону своих ритуалов и ведет богослужение на языке, непонятном простому народу. Социологи и финансисты имеют свой собственный жаргон, непонятный постороннему. Таким же способом поддерживается и величие закона. Профессия медика лишилась бы своего ореола, если бы описывались болезни и выписывались лекарства не на латыни. Но все это не столь важно, ибо эти науки, искусства или ремесла не так связаны с жизнью, как физика. Физика же в настоящее время играет решающую роль, и от этого она, по-видимому, и страдает.

Эйнштейн. Но я не знаю, против чего следовало бы возражать больше, чем против идеи науки для ученых. Это так же плохо, как искусство для художников и религия для священников. Разумеется, в том, что Вы сказали, есть доля истины. И я убежден, что распространенная в настоящее время мода применять аксиомы физической науки к человеческой жизни не только полностью ошибочна, но и заслуживает известного порицания. Я считаю, что обсуждаемая в физике проблема причинности не является новым явлением в области науки. Метод, используемый в квантовой физике, должен применяться и в биологии, потому что биологические процессы в природе нельзя проследить до такой степени, чтобы стали ясны их взаимосвязи. По этой причине биологические законы должны иметь статистический характер. И я не понимаю, к чему надо было поднимать такой шум, когда оказалось, что на принцип причинности в современной физике приходится наложить какие-то ограничения. Такая ситуация отнюдь не является новой.

Мэрфи. Разумеется, ни к какой новой ситуации это не привело бы, но биологическая наука в настоящий момент не является столь жизненно важной, как физическая наука. Людей не слишком интересует, произошли ли мы от обезьяны или нет. Этим могут интересоваться лишь некоторые любители животных, да и те считают, что обезьяны стоят на слишком высокой ступени развития, чтобы быть предками человека. У широкой публики нет того интереса к биологии, который наблюдался во времена Дарвина и Гексли. Центр тяжести ее интересов переместился в физику. Именно поэтому публика на свой лад откликается на каждую новую идею в физике.

Эйнштейн. Я полностью согласен с нашим другом Планком и разделяю занятую им позицию по этим вопросам, но Вы, должно быть, и сами помните, что говорил и писал Планк. Он допускает, что при современном положении вещей применение принципа причинности к внутренним процессам в атомной физике невозможно, но решительно выступает против тезиса о том, что из неприменимости этого принципа следует отсутствие причинности во внешнем мире. Сам Планк по этому поводу ничего определенного не высказывает. Он лишь высказывает свое несогласие с утверждениями, на которых настаивают некоторые сторонники квантовой теории. В этом я полностью с ним солидарен. Когда же Вы говорите о людях, рассуждающих о таких вещах, как свобода воли в природе, мне трудно найти подходящий ответ. Разумеется, эта идея абсурдна.

Мэрфи. Но Вы согласны с тем, что физика не дает никаких оснований для столь незаконного применения того, что можно для удобства назвать принципом неопределенности Гейзенберга?

Эйнштейн. Согласен.

Мэрфи. Но Вам известно, что некоторые английские физики, занимающие очень высокое положение и в то же время пользующиеся широкой известностью, приняли деятельное участие в распространении тех идей, которые Вы и Планк, а также и многие другие вместе с Вами, назвали необоснованными выводами?

Эйнштейн. Следует различать физика и литератора в тех случаях, когда этими двумя профессиями занимается одно лицо. В Англии существует великая английская литература и высокая дисциплина стиля.

Мэрфи. В литературе питают ненависть к той amor intellectualis, к истине, которая является страстью ученых. По-видимому, английский ученый, предаваясь своим литературным развлечениям, так искусно меняет окраску, что его так же трудно обнаружить, как гусеницу на древесном листе.

Эйнштейн. Я имею в виду, что в Англии некоторые ученые, выступая как авторы популярных книг, позволяют себе быть нелогичными и романтически настроенными, но в своей научной работе они действуют как мыслители, обладающие способностью к точным логическим построениям.

Цель ученого состоит в том, чтобы дать логически непротиворечивое описание природы. Логика для него означает то же, что законы пропорции и перспективы для художника. Так же, как и Пуанкаре, я считаю, что наукой стоит заниматься, ибо она позволяет открывать красоту природы. Наградой ученому служит то, что Анри Пуанкаре называет радостью познания, а не те возможные применения, которые может найти его открытие.

На мой взгляд, ученый занимается построением идеально гармоничной картины, придерживаясь некоторой математической схемы. Он бывает очень рад, если ему удастся установить с помощью математических формул связь между различными частями этой картины, и не задает вопроса о том, являются ли эти связи доказательством того, что во внешнем мире действует закон причинности, и если да, то в какой мере.

Мэрфи. Профессор, позвольте обратить Ваше внимание на то, что в один прекрасный день может произойти, когда Вы будете кататься на своей яхте по озеру. Разумеется, то, о чем я хочу сказать, не часто случается в тихих водах озера Капут, поскольку оно расположено среди низины и внезапных порывов ветра на нем не бывает. Но если Вы идете с попутным ветром под парусом по одному из наших северных озер, Вы всегда рискуете внезапно перевернуться из-за неожиданного порыва ветра. Этим я хочу сказать, что позитивист мог бы без особого труда опровергнуть Ваши рассуждения. Если Вы скажете, что ученый занимается тем, что проводит свои умственные построения на строго логической (математической) основе, Вас тотчас же обвинят в

поддержке субъективного идеализма, защищаемого такими современными учеными, как, например, сэр Артур Эддингтон.

Эйнштейн. Но это было бы смешно.

Мэрфи. Разумеется, такое обвинение было бы необоснованным, но в британской прессе так широко распространено мнение, что Вы разделяете теорию, согласно которой внешний мир является производным от сознания. Я обратил на это внимание моего английского друга м-ра Джоуда, написавшего превосходную книгу под названием «Философские аспекты науки». В этой книге проводится точка зрения, противоположная той, которую разделяют сэр Артур Эддингтон и сэр Джеймс Джинс, и Ваше имя упоминается как имя противника их теорий.

Эйнштейн. Ни один физик не верит, что внешний мир является производным от сознания, иначе он не был бы физиком. Не верят в это и названные Вами физики. Следует отличать литературную моду от высказываний научного характера. Названные Вами люди являются настоящими учеными, и их литературные работы не следует считать выражением их научных убеждений. Зачем кто-нибудь стал бы любоваться звездами, если бы он не был уверен в том, что звезды действительно существуют? Здесь я полностью согласен с Планком. Мы не можем логически доказать существование внешнего мира. Более того, Вы не можете логически доказать, что я сейчас разговариваю с Вами или что я нахожусь здесь. Но Вы знаете, что я здесь, и ни один субъективный идеалист не сможет убедить Вас в противоположном.

Мэрфи. Эту точку зрения очень подробно разъяснили еще схоласты, и я не могу отделаться от мысли, что многих ошибочных точек зрения, господствовавших в девятнадцатом веке и распространенных донныне, можно было бы избежать, если бы разрыв с философскими традициями, произошедший в семнадцатом веке, не был бы столь глубоким. То, с чем столкнулся современный физик, схоласты сформулировали очень отчетливо. Они описывали мысленные образы внешней реальности как существующие *fundamentaliter in re, formaliter in mente* («основательно на деле, формально в уме» — *Ред.*).

1932 г.

Наука и Бог. Диалог

Мэрфи. В прошлом году на собрании американских ученых в Нью-Йорке один из ораторов высказал мысль о том, что настало время, когда наука должна дать новое определение Бога.

Эйнштейн. Абсолютно нелепая мысль!

Мэрфи. Но дальше последовало нечто более нелепое. Из этого инцидента возникла публичная дискуссия, в которой горячее участие приняли печать и представители церкви. Общий смысл выступлений последних сводился к тому, что вовлечение Бога в научную дискуссию неуместно, ибо наука не имеет ничего общего с религией.

Эйнштейн. Думаю, что обе точки зрения основаны на весьма поверхностных представлениях о науке, как, впрочем, и о религии.

Мэрфи. Но более серьезная и более существенная сторона возникшей ситуации заключается в следующем: публичная дискуссия показала, что ученый, о котором я говорил, выразил мнение широкой публики. Во всем мире, особенно в Германии и в Америке, люди обращаются к науке в поисках духовной поддержки и вдохновения, которых им, по всей видимости, не может дать религия. В какой мере современная наука может удовлетворить эту потребность? Я бы хотел, профессор, услышать Ваше мнение по этому вопросу.

Эйнштейн. Если говорить о том, что вдохновляет современные научные исследования, то я считаю, что в области науки все наиболее тонкие идеи берут свое начало из глубоко религиозного чувства, и что без такого чувства эти идеи не были бы столь плодотворными. Я полагаю также, что та разновидность религиозности, которая в наши дни ощущается в научных исследованиях, является единственной созидательной религиозной деятельностью в настоящее время, ибо ныне вряд ли можно считать, что и искусство выражает какие-то религиозные инстинкты.

Science and God: A Dialogue. Forum, 1930, 83, 373–379. (Салливэн — математик, Мэрфи — писатель. — *Ред.*)

Салливэн. Как можно утверждать, будто высшие научные достижения выражают религиозное чувство? Разве религия не возникает по сути дела из попыток найти смысл жизни? Разве ее возникновение не обусловлено главным образом тем, что в мире есть страдание?

Эйнштейн. Не думаю, чтобы высказанная Вами концепция религии была очень глубокой. Истинно великие религиозные люди исходили совсем из другой концепции.

Салливэн. Но Вы, профессор, согласны с тем, что Достоевский является великим религиозным писателем?

Эйнштейн. Согласен.

Салливэн. Мне кажется, что основная проблема, рассмотрением которой он занимался, — это проблема страдания.

Эйнштейн. Я не согласен с Вами. Дело обстоит иначе. Достоевский показал нам жизнь, это верно; но цель его заключалась в том, чтобы обратить наше внимание на загадку духовного бытия и сделать это ясно и без комментариев. При таком подходе никакой проблемы не возникает, и Достоевский никакой проблемы не рассматривал.

Мэрфи. И современная наука вряд ли занимается рассмотрением проблем. Я имею в виду высшие отрасли научного исследования. Цель Вашей работы, профессор, и работ Ваших коллег, таких как Макс Планк, Шрёдингер, Гейзенберг, Эдингтон и Милликен, выше и шире той цели, которую ставили перед собой ученые-исследователи старой школы. Для них главный интерес заключался в более близкой проблеме: открытии законов природы, которые позволили бы человеку управлять силами природы и использовать их для собственной пользы и удобства. Это особенно заметно на примере открытий в области химии или электротехники. Обывательский разум и поныне все еще вопрошает, какая польза от теории относительности. Обывательский разум не настолько дальновиден, чтобы понять, что теория относительности — это лишь первая фаза той работы, которую Вы и Ваши коллеги ведете по созданию величественного здания научной теории, венцом которой явится подлинная космология, основанная на объективном изучении фактов. Эта теория должна в конечном счете занять место тех субъективных проекций нашего разума на внешний мир, которые составляют основу философий Аристотеля и Платона, а на самом деле всего, что в наши дни называется философией. В какой мере научная теория, создаваемая Вами и Вашими коллегами, может стать философией, способной предпринять попытки установления практических идеалов жизни на руинах религиозных идеалов, потерпевших в последнее время столь ужасное поражение? Именно в этом заключается наша главная тема.

Эйнштейн. Практическая философия означала бы философию поведения. Я не считаю, что наука может учить людей морали. Я не верю, что философию морали вообще можно построить на научной основе. Например, Вы не могли бы научить людей, чтобы те завтра пошли на смерть, отстаивая научную истину. Наука не имеет такой власти над человеческим духом. Оценка жизни и всех ее наиболее благородных проявлений зависит лишь от того, что дух ожидает от своего собственного будущего. Всякая же попытка свести этику к научным формулам неизбежно обречена на неудачу. В этом я полностью убежден. С другой стороны, нет никаких сомнений в том, что высшие разделы научного исследования и общий интерес к научной теории имеют огромное значение, поскольку приводят людей к более правильной оценке результатов духовной деятельности. Но содержание научной теории само по себе не создает моральной основы поведения личности.

Мэрфи. И все же люди питают к науке своеобразное религиозное чувство, которое временами перерастает почти в религиозный фанатизм. Вы, наверное, слышали о той давке, которую устроили в Нью-Йорке, когда люди давили и увечили друг друга, стремясь во чтобы то ни стало попасть на лекцию по теории относительности?

По-видимому, они надеялись, что смогут получить некое неосознанное воодушевление, приобщаясь к великой истине, понять которую они не смогли. Когда я прочитал об этом в газетах, я невольно представил себе битвы времен раннего христианства, когда люди сражались и погибали во имя абстрактных учений о Троице.

Эйнштейн. Да, я читал об этом. Думаю, что необычайный интерес, питаемый сейчас к науке широкой общественностью, и важное место, отводимое науке в умах человечества, являются наиболее яркими проявлениями метафизических потребностей нашего времени. Люди, по-видимому, начинают уставать от материализма в вульгарном его понимании, ощущать пустоту жизни и искать нечто, выходящее за рамки сугубо личных интересов. Всеобщий интерес к научной теории вовлек в игру высшие сферы духовной деятельности, что не может не иметь огромного значения для морального исцеления человечества.

Мэрфи. Что можно предпринять для изучения научной теории как общекультурной дисциплины молодыми людьми в колледжах и университетах?

Эйнштейн. Если говорить о научной истине в целом, то необходимо развивать творческие способности и интуицию. Все здание научной истины можно возвести из камня и извести ее же собственных учений, расположенных в логическом порядке. Но чтобы осуществить такое построение и понять его, необходимы творческие способности художника. Ни один дом нельзя построить только из камня и извести.

Особенно важным я считаю совместное использование самых разнообразных способов постижения истины. Под этим я понимаю, что наши моральные наклонности и вкусы, наше чувство прекрасного и религиозные инстинкты вносят свой вклад, помогая нашей мыслительной способности прийти к ее наивысшим достижениям. Именно в этом проявляется моральная сторона нашей природы — то внутреннее стремление к постижению истины, которое под названием *amor intellectualis* так часто подчеркивал Спиноза. Как Вы видите, я полностью согласен с Вами, когда Вы говорите о моральных основах науки. Но обращать эту проблему и говорить о научных основах морали нельзя.

Мэрфи. Но в таком случае Вы расходитесь во мнениях с бихевиористами или даже с евгенистами, считающими, что в своем поведении человек должен руководствоваться светом научного учения.

Эйнштейн. Я считаю, что высказал свою точку зрения достаточно ясно.

1932 г.

Физика и реальность

§ 1. Общие соображения о методе науки

Часто и, конечно, не без основания говорят, что естествоиспытатели — плохие философы. Не казалось ли бы тогда естественным, чтобы физик предоставил заботы о философствовании философу? Так на самом деле и надо было поступать в те времена, когда физик верил, что он располагает прочной системой законов и основных понятий, установленных настолько твердо, что волны сомнений не могли их касаться. Но это уже перестало быть справедливым в такую эпоху, как наша, когда проблематичными стали даже самые основы физики. В настоящее время, следовательно, когда эксперимент заставляет нас искать новый и более солидный фундамент, физик уже не может просто уступить философу право критического рассмотрения теоретических основ; он, безусловно, лучше знает и чувствует, в чем слабые стороны этой основы. В поисках нового фундамента он должен стараться полностью понять, до какого предела используемые им понятия обоснованы и необходимы.

Вся наука является не чем иным как усовершенствованием повседневного мышления. Поэтому критический ум физика не может ограничиваться рассмотрением понятий только его собственной области. Он не может двигаться вперед без критического рассмотрения значительно более сложной проблемы: анализа природы повседневного мышления.

В нашем подсознании проходит вереница воспринятых опытов, сохраняющихся в памяти картин, представлений и ощущений. В противоположность психологии физика непосредственно рассматривает только ощущения, чувственные восприятия, пытаюсь «понять» связи

Physik und Realitat. Journ. Franklin Institut, 1936, 221, 313-347 (немецкий текст) и 349-382 (английский текст).

между ними. Само понятие нашего повседневного мышления о «реальном внешнем мире» также опирается исключительно на чувственные восприятия.

Прежде всего мы должны отметить, что нельзя отличить чувственные восприятия от представлений или, по крайней мере, нельзя это сделать с абсолютной уверенностью. Мы не хотим вступать в обсуждение этой проблемы, которая также касается понятия реальности, но будем считать чувственный опыт как данный, т. е. как физический опыт особого рода.

Я думаю, что первым шагом в познании «реального внешнего мира» является формирование понятия телесных объектов, причем телесных объектов разного рода. Из всего многообразия наших чувственных восприятий мы мысленно выделяем и произвольно берем определенные комплексы ощущений, которые часто повторяются (частично вместе с чувственными впечатлениями, интерпретируемыми как проявления ощущений других лиц), и сопоставляем им некоторое определенное понятие — понятие телесных объектов. С логической точки зрения это понятие не тождественно совокупности ощущений, к которому оно относится; это — свободное творение человеческого (или животного) разума. С другой стороны, смысл понятия и его оправданность определяются совокупностью ощущений, которые мы ассоциируем с ним.

Второй шаг состоит в том, что в нашем мышлении (которое определяет наше ожидание) мы приписываем понятию телесного объекта смысл, который еще в большей мере независим от чувственного ощущения, первоначально его породившего. Именно это мы хотим выразить, когда приписываем телесному объекту «реальное существование». Оправдание такого утверждения основано исключительно на том факте, что с помощью таких понятий и установленных между ними мысленных отношений мы способны ориентироваться в лабиринте ощущений. Эти понятия и отношения, несмотря на то, что они являются свободными творениями нашего ума, представляются нам более прочными и нерушимыми, чем даже сами по себе отдельные чувственные восприятия, характер которых никогда не позволяет полностью гарантировать, что они не являются результатом иллюзии или галлюцинации. С другой стороны, эти понятия и отношения, в особенности допущение существования реальных объектов и, вообще говоря, существование «реального мира», оправданы только в той мере, в какой они связаны с чувственными восприятиями, между которыми они образуют мысленную связь.

Сам факт, что совокупность наших чувственных восприятий с помощью мышления (оперирование понятиями, создание и использова-

ние определенных функциональных соотношений между ними, сопоставление чувственных восприятий этим понятиям) может быть приведена в порядок, является, по-моему, поразительным, и мы никогда его не поймем. Мы можем сказать, что «вечная загадка мира — это его познаваемость». Одна из больших заслуг Канта состоит в том, что он показал бессмысленность утверждения о реальности внешнего мира без этой познаваемости.

Когда мы говорим о «познаваемости», то смысл этого выражения совсем прост. Оно включает в себя приведение в определенный порядок чувственных восприятий путем создания общих понятий, установление соотношений между этими понятиями и между последними и чувственным опытом; эти соотношения устанавливаются всеми возможными способами. В этом смысле мир нашего чувственного опыта познаваем. Сам факт этой познаваемости представляется чудом.

По моему мнению, нельзя ничего утверждать априори относительно способа, с помощью которого должны быть образованы и связаны между собой эти понятия, и как мы должны сопоставлять их чувственному опыту. Определяющим фактором, направляющим создание такого порядка в чувственном опыте, является только конечный успех. Все, что необходимо, — это *установление ряда* правил, так как без таких правил познание в указанном смысле было бы невозможно. Эти правила можно сравнить с правилами игры, которые, будучи произвольными, делают игру возможной только благодаря своей строгости. Но такая фиксация никогда не может быть окончательной. Они будут справедливы только для определенной области их применения (т. е. они не являются окончательными категориями в смысле Канта).

Связь между элементарными понятиями повседневного мышления и комплексами чувственного опыта можно понять только интуитивно, ее нельзя подогнать под научную или логическую схему. Совокупность этих связей, — ни одну из которых нельзя выразить на языке понятий, — единственное, что отличает великое здание науки от логической, но пустой системы понятий. С помощью этих связей чисто абстрактные теоремы становятся утверждениями, относящимися к комплексам чувственных ощущений.

Назовем «первичными» те понятия, которые непосредственно и интуитивно связаны с типичными комплексами чувственных ощущений. Все остальные понятия с физической точки зрения обладают смыслом только в той мере, в какой теоремы связывают их с первичными понятиями. Эти теоремы представляют собой частично определения понятий (и логически вы-

веденные из них утверждения), частично — теоремы, которые нельзя вывести из определений, но которые по крайней мере косвенно выражают соотношения между «первичными понятиями» и тем самым — между чувственными восприятиями. Теоремы этого последнего рода являются «утверждениями относительно реальности» или «законами природы», т. е. теоремами, которые должны показать свою полезность, когда они применяются к чувственным восприятиям, охватывающим первичные понятия. Вопрос о том, какие теоремы должны считаться определениями, а какие — законами природы, зависит в большой мере от выбранных представлений. В действительности, установление этого различия становится совершенно необходимым только при определении того, не является ли вся система понятий с физической точки зрения бессодержательной.

Расслоение научной системы. Целью науки является, с одной стороны, возможно более полное познание связи между чувственными восприятиями в их совокупности и, с другой стороны, достижение этой цели путем *применения минимума первичных понятий и соотношений* (добиваясь, насколько это возможно, логического единства в картине мира, т. е. стремясь к минимуму логических элементов).

Наука занимается совокупностью первичных понятий, т. е. понятий, непосредственно связанных с чувственными восприятиями, и теоремами, устанавливающими связь между ними. На первой стадии своего развития наука не содержит ничего другого. Короче говоря, наше повседневное мышление удовлетворено этим уровнем. Но такое состояние вещей не может удовлетворять истинно научный интеллект, потому что совокупность понятий и полученных таким образом соотношений лишена логического единства.

Чтобы устранить этот недостаток, изобретают систему с меньшим числом понятий и соотношений, систему, в которой первичные понятия и соотношения «первого слоя» сохраняются в качестве производных понятий и соотношений. Эта новая, «вторичная система», которая характеризуется большим логическим единством, содержит зато только такие собственные элементарные понятия (понятия второго слоя), которые прямо не связаны с комплексами чувственных ощущений. Продолжая усилия для достижения логического единства, мы приходим, как следствие вывода понятий и соотношений второго слоя (и косвенно — первого слоя), к третичной системе, еще более бедной первичными понятиями и соотношениями.

Эта история будет продолжаться до тех пор, пока мы не достигнем наибольшего мыслимого единства и наименьшего числа понятий в логической основе, которое еще совместимо с наблюдениями наших чувств.

Мы не знаем, приведет это стремление или нет к определенной системе. Если поинтересуются нашим мнением, то мы склонны ответить отрицательно. Однако, преодолевая эти трудности, мы никогда не оставим надежду, что эта величайшая из всех цель действительно может быть достигнута с очень высоким приближением.

Сторонник абстрактного метода или индукции может назвать наши слои «степенями абстракции», но я не считаю правильным скрывать логическую независимость понятия от чувственного восприятия. Отношение между ними аналогично не отношению бульона к говядине, а скорее отношению гардеробного номера к пальто.

Впрочем, слои не разделены четко. Также не совсем ясно, какие понятия относятся к первичному слою. Надо сказать, что мы имеем дело со свободно образованными понятиями, которые с достаточной для практического использования достоверностью интуитивно связаны с чувственными восприятиями так, что для каждого конкретного опыта не возникает сомнений в справедливости высказанных утверждений. Существенное состоит в стремлении представить в близкой связи с опытом множество понятий и теорем как теоремы, выведенные логически из возможно более узкого круга свободно выбираемых фундаментальных понятий и соотношений (аксиом).

Но свобода выбора здесь все-таки особого рода. Она непохожа на свободу пишущего роман, а скорее похожа на свободу человека, обязанного решать хорошо составленный кроссворд. Он, собственно говоря, может предложить любое слово в качестве решения, но только *одно* слово действительно решает кроссворд во всех его частях. То, что природа — в том виде, в котором она воспринимается нашими пятью чувствами, — принимает характер красивой загадки, является делом убеждения. Успехи, достигнутые наукой до сих пор, дают, правда, определенную поддержку этому убеждению.

Множественность слоев, о которых говорилось выше, соответствует разным стадиям прогресса, являющегося результатом борьбы за единство в ходе развития науки. Но по отношению к конечной цели промежуточные слои имеют лишь временный характер. В конечном счете они должны исчезнуть, как не имеющие прямого отношения к делу. Однако мы должны заниматься современной наукой, где эти слои отражают отдельные, частично проблематичные успехи, которые, с одной стороны, подтверждают друг

друга, но, с другой — угрожают друг другу, ибо современная система понятий содержит глубоко укоренившиеся противоречия, с которыми мы позже встретимся.

Целью последующего изложения будет показать, какими путями созидающий разум человека добивается создания фундамента физики, который является логически настолько единообразным, насколько это оказалось возможным.

§ 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 мы увидим позже, субъективное время приводит затем, через понятия телесного объекта и пространства, к понятию объективного времени.

Понятию объективного времени все же 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 от-

носительных положений имеется одно особого рода, которое мы называем «контактом»*.

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 B_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 B_0 (тела отсчета), является, по-моему, эмпирической основой нашего понятия о пространстве. В донаучном мышлении роль B_0 и его продолжения играла твердая кора Земли. Само название геометрии указывает, что понятие пространства психологически связано с Землей как неподвижным телом.

Смелое введение понятия «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, расположенная в некоторой точке пространства P », означает, что предмет касается точки P тела отсчета типа B_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, 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 тройки 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

$$s^2 = (x''_1 - x'_1)^2 + (x''_2 - x'_2)^2 + (x''_3 - x'_3)^2$$

* 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.

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 физики 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 самих таких свойств).

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 показаниями «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 первому утверждению: 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 второму утверждению: господствовавшая до появления теории относительности иллюзия, что с точки зрения опыта смысл одновременности пространственно разделенных событий, а следовательно, смысл времени в физике, ясен априори, 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 вредным в науке. Но если думать, что эти понятия, происхождение которых забыто, являются необходимыми и незыблемыми 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:

(а). 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» B_0) путем задания x_1, x_2, x_3 как функций времени.

(б). Закон инерции: исчезновение компонент ускорения для материальной точки, достаточно удаленной от всех остальных точек.

(с). Закон движения (для материальной точки): сила = масса \times \times ускорение.

(d). Закон сил (действие и противодействие между материальными точками).

Здесь (b) является не чем иным как важным частным случаем (с). Истинная теория существует только тогда, когда заданы законы сил. Для того чтобы система точек, связанных друг с другом 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 пространства, происходящим от твердых тел, пространство B_0 входит в форму, которая содержит новую идею: требования (b) и (с) справедливы (при заданном законе силы) не для всего пространства B_0 , а только для некоторого B_0 с близкими условиями движения (инерциальной системы). Вследствие этого координатное 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)*.

Классическая механика является лишь общей схемой; она становится теорией только после явного указания закона сил (d), что с таким успехом было сделано Ньютоном для небесной механики. Но чтобы достигнуть наибольшей логической простоты фундамента, этот теоретический метод неудовлетворителен в том смысле, что законы сил 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 недостаточна, чтобы служить фундаментом для всей физики, она всегда находится в центре всего мышления в физике. Причина состоит

* Этот недостаток теории мог быть устранен только такой формулировкой механики, которая была бы действительна во всем B_0 . 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. (В упомянутом опыте с ведром речь идет о форме поверхности воды в сосуде, вращающемся вокруг своей оси. — *Ред.*)

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 основаниями 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 «материальной точки» 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 неизменными эти материальные точки и законы сил, действующих между ними, 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» — «Гипотез не измышляю»). Чтобы не запутаться безнадежно в таких рассуждениях (атомистических), 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 структурных свойств системы, то конфигурация с достаточной точностью может быть описана сравнительно небольшим числом переменных q_i ; 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, яв-

ляется механика так называемых сплошных сред. Эта механика характеризуется фиктивным допущением, что плотность и скорость материи непрерывным образом зависят от координат и времени и что незаданная 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 состояния 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 размеров 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 в результате отождествления атомных структурных единиц с материальными точками, хотя чисто умозрительный характер таких структурных единиц и был очевиден. Никто не может надеяться когда-либо «прямо воспринимать» атом. Законы, описывающие поведение величин, более тесно 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 переведена с помощью механики Ньютона, примененной к атомам и молекулам, 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 существенно менее успешна, чем в указанных выше 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 кристаллооптики и теории звука, уже достаточно развитой к этому моменту. Нужно признать, что теория Гюйгенса также была основана на классической механике. Но как носитель волновых движений должен был рассматриваться всепроникающий эфир, к построению которого из материальных точек не могли привести никакие известные явления. 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, лишенным 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 конструктивном развитии теории, который увеличил расстояние между фундаментом теории и тем, что мы можем узнать нашими пятью чувствами. Существование поля проявляется фактически только тогда, когда вводится электрически заряженное тело. Дифференциальные уравнения Максвелла связывают пространственные и временные производные электрического поля и магнитного поля. Электрические заряды выступают только как области с отличной от нуля дивергенцией электрического поля. Свет появляется в виде электромагнитного волнового процесса 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 приатков 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. Однако вначале 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 при рассмотрении магнитного поля, а также соотношения между плотностью электрического тока и полем. Для избавления от трудностей Г.А. Лоренц нашел способ, который од-

новременно 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, комбинируя уравнения в частных производных (уравнения Максвелла для поля в пустоте) и уравнения в полных производных (уравнения движения точки); этот прием противоестественный. Неудовлетворительность 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 (кажущийся) в его инерцию. Нельзя ли объяснить *полную* инерцию частиц электромагнитным путем? Ясно, что эта задача могла быть разработана удовлетворительно только в том случае, 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. Но эти попытки не увенчались успехом. И в результате стоявшая в то время цель — построение чисто полевой электромагнитной теории материи — не была достигнута, хотя нельзя было привести никаких возражений 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 века 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 определенного успеха?

Наиболее удовлетворительное положение, безусловно, достигается в том случае, когда новые фундаментальные гипотезы навеяны самим экспериментом. Составляющая основу термодинамики гипотеза о невозможности вечного двигателя 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 выполняется ли закон инвариантности скорости света относительно любой инерциальной системы? Если это не справедливо, то 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 выражения

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

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 единственно разумное.

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 специальной 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, которое определяется дифференциальными уравнениями, заняло место силы.

Так как теория, о которой идет речь, допускает взаимодействие только между полями, становится необходимой теория гравитационного поля. Действительно, нетрудно сформулировать теорию, в которой, как 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 независимо 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 масса тождественны.

Отсюда вытекает, что нет никаких доводов считать преимущество «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 $ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$ (суммирование по μ и ν), где $g_{\mu\nu}$, симметричные относительно μ и ν , являются некоторыми функциями x_1, \dots, 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 $g_{\mu\nu}$ (т. е. римановой метрикой) обосновано и в *общем* случае, когда не существует системы координат, относительно которой метрика приобретает простую квазиевклидову 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 завершен-

ное, 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, характеризующих геодезическую.

2. Вместо ньютоновского закона гравитационного взаимодействия мы найдем систему наиболее простых общековариантных дифференциальных уравнений, которую можно установить для тензора $g_{\mu\nu}$. Она образуется сведением к нулю однократно свернутого тензора кривизны Римана ($R_{\mu\nu} = 0$).

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

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = -T_{ik},$$

где R обозначает скалярную риманову кривизну, T_{ik} — 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 движения» материи в форме уравнений в частных производных для случая, когда T_{ik} вводит для описания материи только *четыре* функции, совершенно независимые друг от друга (например, плотность, давление и компоненты скорости, где между последними существует тождество, а между давлением и плотностью — уравнение состояния).

При такой формулировке вся механика гравитации 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 ограничиваться пространством, свободным от весомой материи и электрической плотности. Все, что необходимо сделать, — это взять во втором члене приведенного выше уравнения для T_{ik} 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 согласованности число дифференциальных тождеств. Можно добавить, что это необходимое формальное свойство всей системы уравнений оставляет произвольным выбор знака T_{ik} , что окажется важным в дальнейшем.

Следствием 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 Калуцы 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 произвола, 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, для того чтобы получить полную теорию для материи, состоящей из атомов? В такой теории сингулярности 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 ис-

править недостаток путем введения новых переменных поля, переработав и расширив систему уравнений поля. Между тем я в сотрудничестве с доктором Розеном недавно открыл, что отмеченное выше 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 § 6. Таким образом, представляется возможным получить для материи и ее взаимодействий чисто полевою 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 квантов 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 десяти лет назад путем использования двух совершенно различных теоретических методов. Одним из этих методов мы обязаны Гейзенбергу и Дираку, другим — Луи де Бройлю и Шрёдингеру. Математическая эквивалентность обоих методов была вскоре доказана Шрёдингером. Хочу попытаться наметить ход мыслей Луи де Бройля и Шрёдингера, который ближе к способу мышления физиков, и затем изложить некоторые общие соображения.

Вначале вопрос ставится так: каким образом можно определить для системы дискретный ряд значений энергии H_σ , определяемой в смысле классической механики (энергия является заданной функцией координат q_r и соответствующих количеств движения p_r)? Константа Планка h связывает частоту H_σ / h со значениями энергии H_σ . Итак, достаточно считать, что система имеет дискретный ряд 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 Шрёдингер поставил себе задачу сопоставить заданной функции энергии $\varepsilon(q_r, p_r)$ уравнение в частных производных для некоторой скалярной функции ψ , где q_r и время t являются независимыми переменными. Ему это удалось (для комплексной функции ψ) в том смысле, что теоретические значения энергии H_σ , указанные статистической теорией, действительно вытекают удовлетворительным образом из периодического решения уравнения.

Само собой разумеется, что было невозможно сопоставить определенному решению $\psi(q_r, t)$ уравнения Шрёдингера определенное движение материальных точек в механическом смысле. Это означает, что функция ψ не определяет, по крайней мере точно, историю q_r как функции времени. Однако, следуя Борну, физическое значение функций ψ можно интерпретировать следующим образом: $\psi\bar{\psi}$ (квадрат абсолютного значения комплексной функции ψ) является плотностью вероятности конфигураций q_r в момент t в рассматриваемой точке конфигурационного пространства. Следовательно, содержание уравнения Шрёдингера 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 Шрёдингера определяет изменение во времени функции ψ от q .

Необходимо отметить, что результаты этой теории содержат результаты механики точки как предельные значения, когда длина волны, с которой встречаются при решении задачи Шрёдингера, 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 ψ так, что для начального момента t_0 она исчезает вне области G_0 и ведет себя, в соответствии с уравнением Шрёдингера, таким же образом, по крайней мере приближенно, и для последующего времени, но относительно 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, в 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 соответственно 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 ψ описывает реальное состояние механической системы? Допустим, что ψ_r — периодические решения уравнения Шрёдингера (расположенные в порядке возрастания значений энергии). Я оставляю пока в стороне вопрос о том, в какой степени отдельные ψ_r дают *полное* описание физических состояний. Вначале система находится в состоянии ψ_1 с наименьшей энергией. Затем в течение конечного промежутка времени на систему действует небольшая возмущающая сила. Для некоторого последующего момента из уравнения Шрёдингера получаем функцию ψ в виде:

$$\psi = \sum C_r \psi_r,$$

где C_r — постоянные (комплексные). Если ψ_r «нормированы», то C_1 почти равен единице, C_2 и т. д. малы по сравнению с единицей. Можно теперь спросить: описывает ли ψ действительное состояние системы? Если ответ положительный, то единственное, что нам остается, — это приписать* 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 Милликеном 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 ψ никоим образом не описывает состояние самой системы, а скорее представляет собой статистическое описание, при котором C_r 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

* Потому что, согласно прочно установленному следствию теории относительности, энергия системы (в покое) равна ее массе (как целого). А последняя должна иметь вполне определенное значение.

элементы, которые можно уловить лишь статистически, а в самом факте, что функция ψ 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 ψ до взаимодействия. Тогда уравнение Шрёдингера даст функцию ψ после взаимодействия. Определим теперь физическое состояние подсистемы A настолько полно, насколько это допускается измерениями. Тогда квантовая механика позволяет нам определить функцию ψ для подсистемы B по сделанным измерениям и функции ψ 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 ψ нельзя однозначно сопоставить физическое состояние. Это сопоставление нескольких функций ψ 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 ψ сопоставляется с ансамблем систем.*

Тот факт, что квантовая механика позволяет столь просто получить выводы, касающиеся прерывных переходов (кажущихся) из одного состояния системы 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 , 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 ан-

* Операция измерения A , например, также содержит в себе переход к более ограниченному ансамблю систем. Последний (а значит, и его ψ -функция) зависит от того, с какой точки зрения было произведено ограничение ансамбля систем.

самбля систем, а следовательно, бесконечно малые изменения функции ψ ; математическое выражение этих изменений представляет гораздо меньше трудностей, чем представляло математическое выражение 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 отказать 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 Шрёдингера 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, недостаточны, 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 противоестественным, 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 безнадёжность 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 априори сказать по поводу поведения таких существей. 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

* The Particle Problem in the General Theory of Relativity. (With N. Rosen). Phys. Rev., 1935, 48, 73–77. (Проблема частиц в общей теории относительности. (Совместно с Н. Розеном)/А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов. Т. II. — М., Наука, 1966. — Ред.)

рассматривал этот вопрос, а также потому, что в этом случае можно полностью выявить суть проблемы.

Гравитационное поле полностью описывается тензором $g_{\mu\nu}$. В трехиндексном символе $\Gamma_{\mu\nu\sigma}$ также появляются контравариантные тензоры $g^{\mu\nu}$, определяемые как частные от деления миноров $g_{\mu\nu}$ на детерминант $|g_{\alpha\beta}|$. Для того чтобы R_{ik} были определенными и конечными, недостаточно задать систему координат в окрестности любой части континуума, так чтобы $g_{\mu\nu}$ и их первые производные были бы непрерывными и дифференцируемыми; необходимо также, чтобы детерминант нигде не равнялся нулю. Это последнее ограничение, однако, 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:

$$ds^2 = \frac{1}{1 - \frac{2m}{r}} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) + \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2.$$

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 ρ по формуле $\rho^2 = r - 2m$, получим

$$ds^2 = -4(2m + \rho^2) d\rho^2 - (2m + \rho^2)^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) + \frac{\rho^2}{2m + \rho^2} dt^2.$$

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

Если ρ меняется от $-\infty$ до $+\infty$, r меняется от $+\infty$ до $r = 2m$ и обратно до $+\infty$, тогда как значениям $r < 2m$ не соответствуют никакие вещественные значения ρ . Отсюда следует, что решение Шварцшильда становится регулярным, если представить физическое пространство состоящим из двух «оболочек», граничащих вдоль гиперповерхности $\rho = 0$, 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 априори 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 опыта, 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, и мысленный путь от основ к вытекающим из них теоремам, коррелирующим 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.

1936 г.

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 экспериментальной. Один знакомый математик полушутя 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 неприспособленности?

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 системати-

«Preußische Academie der Wissenschaften. Sitzungsberichte», Bd. II, 1914, S. 739–742. (Вступительная речь перед Прусской академией наук в 1914 г. — *Ред.*)

чески применять для достижения цели. Исследователь должен, скорее, вывести 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, несовместимость которого 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 признаться, 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 случай, 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 отдает 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 динамику. Но пока отсутствует фактический материал, на котором можно было бы проверять 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!

1914 г.

Основы теоретической физики

Наука — это попытка привести хаотическое многообразие нашего чувственного опыта в соответствие с некоторой единой системой мышления. В этой системе отдельные опыты сопоставляются с теоретической структурой таким образом, чтобы вытекающее отсюда соответствие было однозначным и убедительным.

Чувственные восприятия нам заданы; но теория, призванная их интерпретировать, создается человеком. Она является результатом исключительно трудоемкого процесса приспособления: гипотетического, никогда окончательно не законченного, постоянно подверженного спорам и сомнениям.

Способ образования понятий в науке отличается от применяемого в повседневной жизни не своими принципами, а лишь более точным определением понятий и следствий, более тщательным и систематическим отбором экспериментального материала и большей экономией мысли.

Под этим последним мы понимаем стремление свести все понятия и соотношения к возможно меньшему числу логически независимых друг от друга основных аксиом и понятий.

То, что мы называем физикой, охватывает группу естественных наук, основывающих свои понятия на измерениях, причем представления и утверждения этих наук поддаются математическому выражению. Следовательно, ее областью является та часть общей суммы нашего знания, которую можно выразить в математических терминах. По мере развития науки область физики настолько расширилась, что кажется ограниченной лишь возможностями собственного метода.

Большая часть физических исследований посвящена развитию различных отраслей физики; предметом каждой отрасли является теоретическое понимание большего или меньшего числа областей опыта;

Из кн.: A. *Einstein*. Out of my later years. London, 1950, p. 98–110.

в каждой из них законы и понятия остаются по возможности тесно связанными с опытом. Именно этот раздел науки со своей постоянно усиливающейся специализацией за последние века революционизировал практическую жизнь и создал, наконец, возможность освобождения человека от бремени физического труда.

С другой стороны, с самого начала проявлялось стремление найти для унификации всех отраслей науки теоретическую основу, образованную минимальным числом понятий и фундаментальных соотношений, из которой логическим путем можно было бы вывести все понятия и соотношения отдельных дисциплин.

Вот что мы понимаем под поиском фундамента для физики в целом. Глубокое убеждение в достижимости этой цели является главным источником страстной преданности, которая всегда воодушевляет исследователя. Последующие замечания посвящены основам физики, понимаемым именно в этом смысле.

Из сказанного становится ясно, что слово «основа» в этой связи не означает чего-то во всех отношениях тождественного фундаменту здания. Правда, с логической точки зрения различные частные законы покоятся на этой основе. Но тогда как фундамент здания может остаться нетронутым, даже если само здание серьезно повреждено сильным штормом или приливом воды, в науке дело обстоит совершенно иначе. Здесь новые опыты или новое открытие представляют бóльшую опасность для логического основания, чем для отдельных дисциплин, которые теснее связаны с опытом. Большое значение основания определяется именно его связью с отдельными частями, но именно в этом таится и опасность перед лицом каждого нового факта. Когда мы отдаем себе в этом отчет, приходится удивляться, почему так называемые революционные эпохи в физике не меняли ее основу чаще и решительнее, чем это в действительности имело место.

Первая попытка установления единой теоретической основы представлена в трудах Ньютона. В его системе все сводится к следующим понятиям: 1) материальные точки с изменяющейся массой; 2) действие на расстоянии между двумя материальными точками; 3) закон движения материальной точки. Эта система не была, строго говоря, всеобъемлющей основой, поскольку закон действия на расстоянии был сформулирован явно только для гравитации, тогда как для всех остальных дальнедействий априори было установлено лишь равенство действия и противодействия. Кроме того, Ньютон полностью отдавал себе отчет, что время и пространство являются существенными элементами, эффективными физическими факторами, хотя в его системе это лишь подразумевалось.

Построенный Ньютоном фундамент оказался исключительно плодотворным и до конца XIX века считался незыблемым. Он не только позволил объяснить до малейших деталей движение небесных тел, но и создал механику дискретных и непрерывных масс, дал простое объяснение принципа сохранения энергии и блестящую законченную теорию тепла. Объяснения электродинамических явлений были несколько искусственными; наименее убедительной с самого начала была его теория света.

Не удивительно, что Ньютон не хотел ничего слышать о волновой теории света; такая теория была наиболее далекой от его общетеоретических воззрений. Предположение, что пространство заполнено состоящей из материальных точек средой, единственным механическим свойством которой является способность передавать свет, должно было ему казаться искусственным. Наиболее веские аргументы в пользу волновой природы света, как то: конечность скорости его распространения, интерференция, дифракция, поляризация — были либо вовсе не известны, либо не систематизированы. Поэтому было естественно, что он остался на точке зрения корпускулярной теории света.

В течение XIX века дискуссия завершилась победой волновой теории. Тем не менее, по поводу возможности механического обоснования физики не выражалось никакого сомнения, в первую очередь, потому, что никто не знал, где найти обоснование другого рода. Только постепенно, под неотразимым давлением фактов, развилось новое обоснование физики — физика поля.

Еще со времен Ньютона теорию дальнего действия всегда считали искусственной. Прилагались усилия объяснить гравитацию кинетически, т. е. на основе сил соударения между гипотетическими материальными частицами. Но эти попытки были поверхностными и ничего не дали. Была также выявлена странная роль, которую играло пространство (или инерциальная система) в обосновании механики; особенно четко ее критиковал Эрнст Мах.

Великая перемена была осуществлена Фарадеем, Максвеллом и Герцем, правда, несколько неосознанно и против их воли. Всю свою жизнь все трое считали себя сторонниками механической теории. Герц нашел простейшую форму уравнений электромагнитного поля и заявил, что любая теория, ведущая к этим уравнениям, является теорией типа максвелловской. Но к концу своей короткой жизни он написал работу, где представил в качестве основы физики механическую теорию, свободную от понятия силы.

Нам, которые впитали идеи Фарадея, так сказать, с молоком матери, трудно оценить их величие и смелость. Благодаря своему

безошибочному инстинкту Фарадей хорошо понимал, насколько искусственны все попытки сведения электромагнитных явлений к взаимодействию на расстоянии электрических частиц. Каким образом каждое зерно в металлических опилках, разбросанных на листке бумаги, могло знать об электрических частицах, циркулирующих в близлежащем проводнике? Казалось, что все эти электрические частицы, взятые вместе, создают в окружающем пространстве определенное состояние, которое, в свою очередь, производит определенное упорядочение в опилках.

Эти состояния пространства, сегодня называемые полями, могли, по мнению Фарадея, объяснить таинственные электромагнитные взаимодействия, как только удалось бы понять их геометрическую структуру и взаимное воздействие. Он представлял себе эти поля как состояния механического натяжения среды, заполняющей пространство, подобно состояниям натяжения в упруго-растянутом теле. В то время это был единственный способ представления состояний, казавшихся непрерывно распределенными в пространстве. Особый характер механической интерпретации этих полей оставался на втором плане — своего рода успокоение научной совести перед лицом механической традиции времен Фарадея.

С помощью этих концепций поля Фарадею удалось дать качественное представление всего комплекса электромагнитных эффектов, открытых им и его предшественниками. Формулировка точных пространственно-временных законов этих полей была делом Максвелла. Вообразите себе охватившие его чувства, когда полученные им дифференциальные уравнения показали, что электромагнитные поля распространяются в виде поляризованных волн со скоростью света. Мало кому из людей в мире довелось испытать такое! В этот радостный момент он, безусловно, не подозревал, что таинственная природа света, казавшаяся полностью выясненной, будет приводить в замешательство еще и последующие поколения.

Между тем физикам понадобилось несколько десятилетий, чтобы понять все значение открытия Максвелла, — настолько дерзким был вызванный его гением скачок вперед по сравнению с концепциями его современников. Спротивление новой теории было сломлено только после того, как Герц экспериментально доказал существование максвелловских электромагнитных волн.

Но если электромагнитное поле может существовать как волна, независимо от материального источника, то электростатическое взаимодействие уже не может быть объяснено действием на рассто-

янии. А то, что было верно для электрического действия, не могло не быть верным и для гравитации. Поэтому ньютоновское дальное действие уступило место полям, распространяющимся с конечной скоростью.

Из всего ньютоновского фундамента теперь оставались только материальные точки, подчиняющиеся закону движения.

Но Дж.Дж. Томсон показал, что, согласно теории Максвелла, находящееся в движении электрически заряженное тело обладает магнитным полем, энергия которого проявляется точно так же, как если бы возросла кинетическая энергия тела. Если, таким образом, часть кинетической энергии представляет собой энергию поля, то нельзя ли утверждать это обо всей кинетической энергии? Может быть, основное свойство материи — ее инерция — объясняется с помощью теории поля? Вопрос привел к задаче толкования материи в терминах теории поля; решение ее должно объяснить атомистическую структуру материи.

Однако вскоре выяснилось, что теория Максвелла не в состоянии выполнить эту программу. С тех пор многие ученые с большим рвением пытались дополнить теорию поля некоторым обобщением, которое содержало бы теорию материи; но до сих пор эти попытки не увенчались успехом. Для построения теории не достаточно иметь ясное понятие о цели. Необходимо также иметь определенную формальную точку зрения, которая в достаточной степени ограничивала бы бесконечное разнообразие возможностей. Пока она не найдена; следовательно, теории поля не удалось дать основу для всей физики.

Несколько десятилетий большинство ученых думали, что для теории Максвелла можно найти некоторую механическую подоснову. Но мало удовлетворяющие результаты их усилий заставили постепенно принять новую концепцию поля в качестве несводимых основных принципов, другими словами, физики смирились с отказом от идеи механического обоснования.

Таким образом, физики стали придерживаться программы теории поля. Но она не могла считаться обоснованием, потому что никто не мог сказать, сможет ли последовательная теория поля когда-нибудь объяснить, с одной стороны, гравитацию и, с другой стороны — элементарные составляющие материи. При таком положении вещей было необходимо представлять материальные частицы как подчиняющиеся законам движения Ньютона. Именно так поступил Лоренц, создавая свою электронную теорию и теорию электромагнитных явлений в движущихся телах.

В таком состоянии находился вопрос об основных понятиях в начале нашего века. Был достигнут колоссальный прогресс в теоретическом понимании целых групп новых явлений, но установление единой

основы для всей физики казалось делом далекого будущего. И это положение вещей усугубилось последующим развитием. В нашем веке развитие определяется двумя теоретическими системами, существенно независимыми друг от друга: теорией относительности и теорией квантов. Эти две теории прямо не противоречат друг другу, но они кажутся мало приспособленными для объединения в единую теорию. Мы должны коротко обсудить основную идею этих двух систем.

Теория относительности зародилась из попыток усовершенствовать, исходя из экономии мысли, существовавшее в начале века основание физики. Так называемая частная теория относительности основывается на том факте, что уравнения Максвелла (а следовательно, и закон распространения света в пустоте) инварианты по отношению к преобразованиям Лоренца. К этому формальному свойству уравнений Максвелла добавляется достоверное знание нами того эмпирического факта, что законы физики одинаковы во всех инерциальных системах. Отсюда вытекает, что переход от одной инерциальной системы к другой должен управляться преобразованиями Лоренца, применяемыми к пространственно-временным координатам. Следовательно, содержание частной теории относительности может быть резюмировано одним предложением: все законы природы должны быть так определены, чтобы они были ковариантными относительно преобразований Лоренца.

Отсюда вытекает, что одновременность двух пространственно-удаленных событий не является инвариантным понятием, а размеры твердых тел и ход часов зависят от их состояния движения. Другим следствием является видоизменение закона Ньютона в случае, когда скорость заданного тела не мала по сравнению со скоростью света.

Между прочим, отсюда вытекал принцип эквивалентности массы и энергии, а законы сохранения массы и энергии объединились в один-единственный закон. Но раз было доказано, что одновременность относительна и зависит от системы отсчета, исчезла всякая возможность сохранить в основах физики дальное действие, ибо это понятие предполагало абсолютный характер одновременности (должна существовать возможность констатации положения двух взаимодействующих материальных точек «в один и тот же момент»).

Общая теория относительности обязана своим происхождением попытке объяснить известный еще со времен Галилея и Ньютона, но не поддающийся никакой теоретической интерпретации факт: два совершенно отличных друг от друга свойства, инертность и тяжесть, измеряются одной и той же константой — массой. Из этого соответствия следует, что экспериментально невозможно устано-

вить, движется ли заданная система координат ускоренно или она движется равномерно-прямолинейно, а наблюдаемые эффекты обусловлены полем тяготения (в этом и состоит принцип эквивалентности общей теории относительности). Введение гравитации разбило понятие об инерциальной системе. Здесь удобно заметить, что инерциальная система является слабым местом механики Галилея—Ньютона, ибо физическому пространству приписывалось некоторое таинственное свойство, обуславливающее вид системы координат, для которой справедливы закон инерции и ньютоновский закон движения.

Этих трудностей можно избежать с помощью следующего постулата: законы природы должны формулироваться так, чтобы их форма оставалась идентичной для систем координат при любом состоянии их движения. В этом состоит задача общей теории относительности. С другой стороны, из частной теории относительности мы вывели существование в пространственно-временном континууме римановой метрики, которая, в соответствии с принципом эквивалентности, описывает и гравитационное поле, и метрические свойства пространства. Предполагая, что уравнения гравитационного поля являются дифференциальными уравнениями второго порядка, мы четко определяем закон поля.

Наряду с этим теория освободила физику поля от неспособности (ею она страдала наравне с ньютоновской механикой) приписывать пространству те независимые физические свойства, которые раньше заслонялись применением инерциальной системы. Но нельзя претендовать на то, что те части общей теории относительности, которые сегодня можно считать завершенными, снабдили физику полным и удовлетворительным фундаментом. Во-первых, полное поле кажется состоящим из двух логически не связанных частей: гравитация и электромагнетизм. Во-вторых, эта теория, подобно прежним теориям поля, до сих пор не дала объяснение атомистической структуре материи. Эта неудача связана, очевидно, с тем, что она до сих пор ничем не способствовала пониманию квантовых явлений. Чтобы понять эти явления, физики вынуждены принять совершенно новые методы, основную характеристику которых мы сейчас рассмотрим.

В 1900 году в ходе чисто теоретического исследования Планк сделал замечательное открытие: закон теплового излучения тел не может быть выведен только из законов электродинамики Максвелла. Чтобы прийти к результатам, согласующимся с опытами, о которых идет речь, излучение заданной частоты должно трактоваться как состоящее из отдельных атомов энергии $h\nu$, где h — универсальная постоянная Планка, ν — частота. В последующие годы

было доказано, что свет всегда излучается и поглощается такими квантами энергии. В частности, Нильс Бор сумел понять строение атома, предполагая, что атомы могут обладать только дискретными значениями энергии и что скачкообразные переходы между этими значениями связаны с излучением и поглощением такого кванта энергии. Это пролило некоторый свет на то обстоятельство, что в газообразном состоянии элементы и их составляющие излучают и поглощают свет только совершенно определенных частот. Все это было абсолютно необъяснимо в рамках существовавших теорий. Стало ясно, что в атомных явлениях по крайней мере характер всего происходящего определяется дискретными состояниями и скачкообразными, по-видимому, переходами между ними, причем постоянная Планка играет решающую роль.

Следующий шаг был сделан Луи де Бройлем. Он поставил вопрос о возможности понимания дискретных состояний с помощью привычных понятий и угадал аналогию со стоячими волнами, которые встречаются, например, для собственных частот органичных труб и струн в акустике. Конечно, требуемые здесь волновые процессы не были известны, но их можно было построить, а их математические законы можно было формулировать, используя постоянную Планка h . Де Бройль представил себе, что с вращающимся вокруг атомного ядра электроном связан цуг таких гипотетических волн и в определенной степени объяснил дискретный характер «разрешенных» боровских орбит стационарным характером соответствующих волн.

Однако в механике движение материальных точек определяется силами или полями сил, действующими на эти точки. Следовало ожидать, что эти поля сил будут аналогичным образом оказывать влияние на волновые поля де Бройля. Эрвин Шрёдингер показал, как можно учесть это влияние, предложив искусный метод новой интерпретации некоторых формул классической механики. Ему удалось также настолько расширить теорию волновой механики, что она могла применяться к любой механической системе, состоящей из произвольного числа материальных точек, т. е. обладающей произвольным числом степеней свободы. Это было возможно потому, что механическая система, состоящая из n материальных точек, в значительной мере математически эквивалентна одной материальной точке, движущейся в пространстве $3n$ измерений.

На основе этой теории удалось удивительно хорошо представить огромное разнообразие фактов, которые иначе казались совершенно непостижимыми. Но, странная вещь, Шрёдингера постигла одна неудача: оказалось невозможным ассоциировать с этими волнами

определенные движения материальных точек, а ведь именно в этом состояла первоначальная цель всего построения.

Трудность казалась непреодолимой, пока ее не победил Борн способом столь же простым, сколь и неожиданным. Волновые поля де Бройля—Шрёдингера не должны были трактоваться как математическое описание реального протекания события во времени и в пространстве, хотя они действительно имеют отношение к такому событию. Они являются скорее математическим описанием того, что мы можем в действительности знать о системе. Они служат только для представления статистических высказываний и предсказаний относительно результатов всех измерений, которые можно произвести над системой.

Проиллюстрируем эти общие черты квантовой механики простым примером: рассмотрим материальную точку, удерживаемую в ограниченной области G силами конечной интенсивности. Если кинетическая энергия материальной точки ниже определенного предела, то, согласно классической механике, она никогда не сможет покинуть область G . Но, согласно квантовой механике, через определенный период, который нельзя непосредственно предсказать, материальная точка способна покинуть область G в непредвиденном направлении и проникнуть в окружающее пространство. Этот случай представляет, по Гамову, упрощенную модель радиоактивного распада.

Квантовая механика следующим образом трактует этот случай: в момент t_0 мы имеем систему шрёдингеровских волн, полностью заключенных внутри G . Но начиная с момента времени t_0 волны покидают G по всем направлениям, так что амплитуда выходящих волн мала по сравнению с начальной амплитудой системы волн внутри G . Чем дальше распространяются внешние волны, тем сильнее уменьшается амплитуда волн внутри G , а в соответствии с этим и амплитуда последующих волн, покидающих G . Только через бесконечное время запас волн внутри G исчерпается, тогда как внешняя волна охватит все большее пространство.

Но какое отношение имеет этот волновой процесс к вопросу, который нас интересовал прежде всего — с частицей, первоначально заключенной в G ? Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны вообразить себе некоторое устройство, позволяющее производить измерения над частицей.

Вообразим себе, например, где-то в окружающем пространстве такого рода экран, что, входя с ним в контакт, частица останавливается. По интенсивности волн, ударяющихся в экран в некоторой точке, мы можем делать заключения о вероятности удара частицы с экраном

в этой точке в данный момент времени. Как только частица ударила в какую-нибудь определенную точку экрана, все волновое поле теряет весь свой смысл; его единственным назначением было сделать вероятностные предсказания относительно места и времени удара частицы об экран (или, например, относительно величины количества движения частицы в момент удара об экран).

Все остальные случаи аналогичны. Целью теории является определение вероятности результатов измерений в системе в заданный момент времени. С другой стороны, она не пытается дать математическое представление того, что действительно имеет место, или того, что происходит в пространстве и во времени. В этом пункте современная квантовая теория радикально отличается от всех предшествующих физических теорий, как механических, так и полевых. Вместо того чтобы дать модель для изображения реальных пространственно-временных событий, она дает распределения вероятностей для возможных измерений как функций времени.

Надо признать, что новая теоретическая концепция обязана своим происхождением не взлету фантазии, а непреодолимой силе опытных фактов. Все попытки представить частицу и волновые свойства, проявляющиеся в явлениях, связанных со светом и веществом, непосредственно пространственно-временной моделью до сих пор кончались неудачно. Как убедительно показал Гейзенберг, всякое утверждение о строго детерминистской структуре природы с эмпирической точки зрения окончательно исключается из-за атомистического строения приборов, применяемых в наших экспериментах.

Очевидно, никакое будущее познание не сможет заставить физиков отказаться от нашего современного статистического теоретического обоснования физики в пользу детерминистского обоснования, которое изучало бы непосредственно физическую реальность. Логически проблема дает, по-видимому, две возможности, из которых мы в принципе можем избрать одну. В конце концов выбор будет определен тем, какое описание позволит формулировать логически простейшее обоснование. В настоящее время мы не владем детерминистской теорией, которая позволяла бы описывать события как таковые и в согласии с реальными фактами.

Пока мы должны признать, что не имеем для физики общей теоретической основы, которую можно было бы считать ее логическим фундаментом. Теория поля до сих пор терпела неудачи в молекулярной области. Всеми признано, что единственный принцип, кото-

рый мог бы служить основой для квантовой теории, может быть получен переводом теории поля на схему квантовой статистики. Но никто не отважится сказать, когда это действительно будет сделано удовлетворительным образом.

Некоторые физики, в том числе и я сам, не могут поверить, что мы раз и навсегда должны отказаться от идеи прямого изображения физической реальности в пространстве и времени или что мы должны согласиться с мнением, будто явления в природе подобны игре случая. Каждому дозволено выбрать направление приложения своих усилий, и каждый человек может найти утешение в прекрасном изречении Лессинга, что поиск истины значительно ценнее, чем обладание ею.

1950 г.

Часть 2

ПАРАДОКСАЛЬНОСТЬ ФИЗИКИ

Познание прошлого и будущего в квантовой механике

(Совместно с Р. Толменом и Б. Подольским)

Известно, что законы квантовой механики ограничивают возможности точного предсказания будущей траектории частицы. Тем не менее иногда предполагается, что квантовая механика допускает точное описание траектории частицы в прошлом.

В настоящей заметке мы обсудим простой мысленный эксперимент, который покажет, что возможность описания траектории одной частицы в прошлом должна привести к таким предсказаниям относительно буду-

щего поведения второй частицы, которые не допускает квантовая механика. Отсюда будет сделан вывод о том, что законы квантовой механики на самом деле включают в себя неопределенность в описании событий прошлого, которая аналогична неопределенности в предсказании событий будущего. Для рассматриваемого случая будет также показано, что эта неопределенность в описании прошлого возникает из-за ограниченности знаний, которые могут быть получены при измерении импульса.

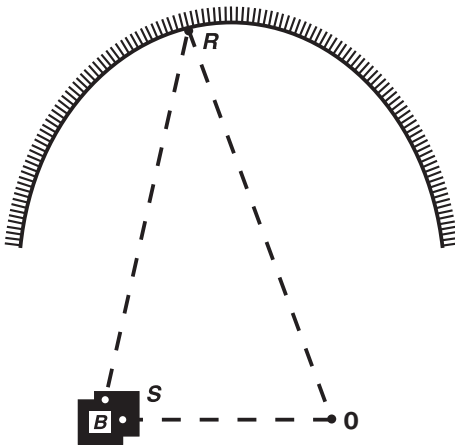


Рис. 1

Рассмотрим изображенный на рис. 1 небольшой ящик B , содержащий некоторое количество одинаковых термически возбужденных частиц и снабженный двумя маленькими отверстиями, которые

Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics. (With R.C. Tolman and B. Podolsky.) Phys. Rev., 1931, 37, 780–781.

закрываются шторкой S . Шторка устроена так, что может автоматически открываться на короткое время и затем снова закрываться; число частиц в ящике выбрано таким, что могут осуществляться случаи, когда одна частица покидает ящик и движется на прямом отрезке SO , а вторая частица благодаря упругому отражению от эллипсоидального отражателя R движется по более длинному пути SRO . Для определения полной энергии вылетевших частиц ящик точно взвешивают до и после того, как шторка открывается; наблюдатель в точке O снабжен средствами для наблюдения — часами для измерения времени прихода частиц и неким прибором для измерения импульса. Кроме того, расстояния SO и SRO предварительно точно измеряются, причем расстояние SO достаточно велико, чтобы ход часов в точке O не возмущался гравитационными эффектами, связанными со взвешиванием ящика, а расстояние SRO очень велико, чтобы сделать возможным точное повторное взвешивание ящика до прихода второй частицы.

Предположим теперь, что наблюдатель в точке O измеряет импульс первой частицы, пока она движется по пути SO , и затем измеряет время ее прихода. Конечно, последнее измерение, выполненное, например, с помощью рассеяния гамма-луча, изменит импульс неизвестным образом. Тем не менее, зная импульс частицы в прошлом и, следовательно, также ее прошлую скорость и энергию, оказалось бы возможным рассчитать, исходя из известного времени прихода первой частицы, время, когда должна была открыться шторка, а из известной потери содержавшейся в ящике энергии при открывании шторки вычислить энергию и скорость второй частицы. Далее, оказалось бы возможным предсказать заранее как энергию, так и время прихода второй частицы — парадоксальный результат, поскольку энергия и время являются величинами, которые в квантовой механике не коммутируют.

Объяснение кажущегося парадокса заключается в том, что движение первой частицы в прошлом не может быть точно определено, как предполагалось вначале. Действительно, мы вынуждены прийти к заключению, что не существует метода измерения импульса частицы, не изменяющего его величины. Например, анализ наблюдения с помощью эффекта Допплера в инфракрасном свете, отраженном от приближающейся частицы, показывает, что хотя он и позволяет определить импульс частицы как до, так и после столкновения со световым квантом, но оставляет неопределенным момент времени, когда происходит столкновение с квантом. Таким образом, хотя скорость первой частицы в нашем примере и можно было бы определить как до, так и после взаимодействия с инфракрасным светом, точное же положение на пути SO , в котором происходит из-

менение скорости, определить невозможно (последнее необходимо для того, чтобы получить точное время, когда была открыта шторка).

Отсюда следует сделать вывод, что принципы квантовой механики должны включать неопределенность в описании событий прошлого, которая аналогична неопределенности в предсказании событий будущего. Нужно также отметить, что хотя и возможно измерить импульс частицы и такое измерение дополнить измерением положения, однако это не даст достаточной информации для полного восстановления ее траектории в прошлом, поскольку было показано, что не существует метода, который позволял бы измерять импульс частицы, не изменяя его величины. Наконец, особенно интересно отметить удивительное следствие, заключающееся в том, что законы квантовой механики фактически накладывают ограничения на локализацию во времени макроскопических явлений, таких, как открывание и закрывание шторки.

1931 г.

О соотношении неопределенностей

Открытое Гейзенбергом соотношение неопределенностей утверждает, что координату и скорость частицы определить с одинаковой точностью невозможно, и что точно можно определить только одну из этих двух величин — координату или скорость. Чем точнее определяется одна величина, тем менее точной будет другая. Представим себе ящик с автоматически открывающимся и закрывающимся клапаном, причем на ящике имеются еще часы; при открывании клапана из ящика выходит луч монохроматического света, представляющий собой цуг из примерно 100 длин волн, который отражается от зеркала, расположенного на известном расстоянии (в несколько световых лет), и затем возвращается к месту наблюдения. Энергию (цвет) выходящего света можно определить путем взвешивания ящика до и после выхода из него цуга волн, время выхода определяется по часам. На примере этого в высшей степени остроумного мысленного эксперимента Эйнштейн показывает, что с помощью измерений в месте наблюдения невозможно предсказать одновременно цвет и время прибытия света. Только *одно* измерение — времени или цвета — можно произвести точно, и притом, по Эйнштейну, сразу после выхода света из ящика можно решить, какое из этих двух измерений мы хотим произвести. Американский физик Толмен обобщил этот мысленный эксперимент таким образом, что и для прошедшего точно можно делать только одно из этих двух высказываний.

1932 г.

Über die Unbestimmtheitsrelation. Zs. angew. Chemie, 1932, 45, 23.
(Сокращенное изложение доклада на Физическом коллоквиуме в Берлине 4 ноября 1931 г.)

О методе теоретической физики

Если вы хотите узнать у физиков-теоретиков что-нибудь о методах, которыми они пользуются, я советую вам твердо придерживаться следующего принципа: не слушайте, что они говорят, а лучше изучайте их работы. Тому, кто в этой области что-то открывает, плоды его воображения кажутся столь необходимыми и естественными, что он считает их не мысленными образами, а заданной реальностью. И ему хотелось бы, чтобы и другие считали их таковыми.

Может показаться, что эти слова звучат как намек на то, чтобы вы покинули эту лекцию. Вы можете сказать: ведь он сам — работающий физик, и потому все размышления о структуре теоретической науки, вероятно, передоверит гносеологам.

Против такой критики я лично могу защититься, заверив вас, что не по собственной инициативе, а по любезному приглашению поднялся я на эту трибуну, которая служит напоминанием о человеке, всю свою жизнь твердо борвшемся за единство знания.

Но по существу мое выступление можно было бы оправдать тем, что каждому интересно знать, что думает о своей науке человек, который всю жизнь отдавал свои силы выяснению и улучшению основ науки. Его точка зрения на прошлое и настоящее своей области, пожалуй, очень сильно зависит от того, с чем он связывает надежды на будущее и что ставит своей целью в настоящем, но это — неизбежный удел всякого, кто интенсивно углубился в мир идей. То же самое происходит и с историком, который точно таким же образом, хотя, может быть, и неосознанно, группирует действительные события вокруг идеальных представлений о человеческом обществе, которые он сам создал для себя.

Бросим теперь беглый взгляд на развитие метода теоретической физики, и при этом обратим особое внимание на отношение между

On the Method of Theoretical Physics. Oxford, Clarendon Press, 1933.
(Спенсеровская лекция, прочитанная в Оксфорде 10 июня 1933 г. — *Ред.*)

содержанием теории и совокупностью опытных фактов. Здесь мы встречаемся с вечным противоречием между двумя нераздельными компонентами человеческого познания в нашей области — опытом и мышлением.

Мы почитаем Древнюю Грецию как колыбель западной науки. Там впервые было создано чудо мысли — логическая система, теоремы которой вытекали друг из друга с такой точностью, что каждое из доказанных ею предложений было абсолютно несомненным: я говорю о геометрии Евклида. Этот замечательный триумф мышления придал человеческому интеллекту уверенность в себе, необходимую для последующей деятельности. Если труд Евклида не смог зажечь ваш юношеский энтузиазм, то вы не рождены быть теоретиком.

Но прежде чем человечество созрело для науки, охватывающей действительность, необходимо было другое фундаментальное достижение, которое не было достоянием философии до Кеплера и Галилея. Чисто логическое мышление не могло принести нам никакого знания эмпирического мира. Всё познание реальности исходит из опыта и возвращается к нему.

Положения, полученные при помощи чисто логических средств, при сравнении с действительностью оказываются совершенно пустыми. Именно потому, что Галилей сознавал это, и особенно потому, что он внушал эту истину ученым, он является отцом современной физики и фактически современного естествознания вообще.

Но если опыт есть начало и конец всего нашего знания реальности, то какова же роль логического мышления в науке? Полная система теоретической физики состоит из понятий, фундаментальных законов, которые должны иметь силу для этих понятий, и следствий, выведенных посредством логической дедукции. Это те следствия, которые должны соответствовать нашему единичному опыту; в любом теоретическом трактате их логический вывод занимает почти все страницы.

Здесь справедливо точно то же, что и в геометрии Евклида, за исключением того, что там фундаментальные законы называются аксиомами, и не возникает вопроса о том, что выводы должны соответствовать какому-либо опыту. Если, однако, евклидову геометрию рассматривают как науку о возможности взаимного расположения реальных твердых тел, т. е. если ее трактуют как физическую науку, не абстрагируясь от ее первоначального эмпирического содержания, то логическое сходство геометрии и теоретической физики становится полным.

Таким образом, мы определили место логического мышления и опыта в системе теоретической физики. Логическое мышление

определяет структуру этой системы; то, что содержит опыт и взаимные соотношения опытных данных, должно найти свое отражение в выводах теории. В том, что такое отражение возможно, состоит единственная ценность и оправдание всей системы и особенно понятий и фундаментальных законов, лежащих в ее основе. В остальном эти последние суть свободные творения человеческого разума, которые не могут быть априори оправданы ни природой этого разума, ни каким-либо другим путем.

Эти фундаментальные понятия и законы, которые дальше не могут быть сводимы, образуют неотъемлемую часть теории, которая не поддается рациональной трактовке. Важнейшая цель любой теории состоит в том, чтобы этих основных несводимых элементов было как можно меньше и чтобы они были как можно проще, однако так, чтобы это не исключало точного отображения того, что содержится в опыте.

Кратко обрисованный здесь взгляд, согласно которому основы научной теории имеют чисто умозрительный характер, еще не был господствующим в XVIII и XIX веках. Но постепенно он получает все более прочную почву, по мере того как в мышлении все более отдаляются друг от друга фундаментальные понятия и законы, с одной стороны, и те выводы, которые должны быть сопоставлены с опытом — с другой, по мере того как унифицируется логическая структура, т. е. по мере уменьшения числа логически независимых друг от друга концептуальных элементов, которые оказываются необходимой опорой всей структуры.

Ньютон, основатель первой обширной, работоспособной системы теоретической физики, был еще убежден в том, что основные понятия и законы его системы происходят из опыта. Его слова «*hypotheses non fingo*» («гипотез не измышляю») можно понять в этом смысле.

Действительно, в то время казалось, что понятия пространства и времени не создавали никаких проблем. Понятия массы, инерции и силы и связанные с ними законы казались взятыми непосредственно из опыта. Раз эта база была принята, то и выражение для силы тяготения казалось выведенным из опыта, и было основание ожидать, что то же самое будет и в отношении других сил.

Правда, из ньютоновских формулировок мы видим, что понятие абсолютного пространства, связанное с понятием абсолютного покоя, доставляло ему неприятное чувство; он понимал, что в опыте, по-видимому, нет ничего, что соответствовало бы этому понятию. Он чувствовал также беспокойство в связи с введением дальнедействующих сил. Но огромный практический успех его учения, по-видимому, воспрепятствовал ему, как и физикам XVIII и XIX веков, признать произвольный характер основ его системы.

Напротив, большинство естествоиспытателей тех времен были проникнуты идеей, что фундаментальные понятия и основные законы физики не были в логическом смысле свободными изобретениями человеческого разума и что они могли быть выведены из экспериментов посредством «абстракции», т. е. логическими средствами. Ясное осознание неправильности этого понимания по существу принесла только общая теория относительности. Эта теория показала, что на фундаменте понятий, сильно отличающемся от ньютонова, можно соответствующий круг опытов объяснить даже более удовлетворительным и совершенным образом, чем это было возможно на ньютоновой основе. Но совершенно не входя в обсуждение степени превосходства той или другой основы, можно сказать, что их умозрительный характер вполне очевиден из того факта, что мы можем указать на две существенно различные основы, которые обе в высокой степени соответствуют опыту. Во всяком случае, это доказывает, что всякая попытка логического выведения основных понятий и законов механики из элементарного опыта обречена на провал.

Если, далее, справедливо, что аксиоматическая основа теоретической физики не может быть извлечена из опыта, а должна быть свободно изобретена, то можем ли мы вообще надеяться найти правильный путь? Более того, не существует ли этот правильный путь только в нашем воображении? Можем ли мы вообще быть уверенными, что опыт — надежный руководитель, если существуют такие теории, как классическая механика, которая широко оправдывается опытом, хотя и не проникает в сущность вещей? Я отвечаю без колебаний, что, по моему мнению, есть правильный путь, и мы в состоянии найти его. Весь предшествующий опыт убеждает нас в том, что природа представляет собой реализацию простейших математически мыслимых элементов. Я убежден, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут нам ключ к пониманию явлений природы. Опыт может подсказать нам соответствующие математические понятия, но они ни в коем случае не могут быть выведены из него. Конечно, опыт остается единственным критерием пригодности математических конструкций физики. Но настоящее творческое начало присуще именно математике. Поэтому я считаю в известном смысле оправданной веру древних в то, что чистое мышление в состоянии постигнуть реальность.

Чтобы обосновать эту уверенность, я вынужден применить математические понятия. Физический мир представляется в виде четырехмерного континуума. Если я предполагаю в нем риманову метрику и спрашиваю, каковы простейшие законы, которые могут

удовлетворить такой метрике, я прихожу к релятивистской теории гравитации для пустого пространства. Если в этом пространстве я предполагаю векторное поле или полученное из него антисимметричное тензорное поле и спрашиваю, каковы простейшие законы, которые могут удовлетворить такому полю, я прихожу к максвелловым уравнениям для вакуума.

У нас нет еще теории для тех частей пространства, в которых плотность электрического заряда не исчезает. Луи де Бройль предположил существование волнового поля, которое должно было объяснить известные квантовые свойства материи. Дирак нашел в спинорах полевые величины нового вида, простейшие уравнения которых позволили вывести общие свойства электронов. Позже, в сотрудничестве с моим коллегой доктором Вальтером Майером, я нашел, что эти спиноры образуют своеобразный вид поля, математически связанного с четырехмерной системой; мы назвали его «полувекторным». Простейшие уравнения, которым такие полувекторы могут удовлетворять, дают нам ключ к пониманию того, почему существуют два вида элементарных частиц с различной тяжелой массой и равным, но противоположным электрическим зарядом. Эти полувекторы являются простейшими после обычных векторов, математическими полевыми образами, которые возможны в метрическом континууме четырех измерений, и это выглядит так, как если бы они естественным образом описывали существенные свойства электрических элементарных частиц.

Для нашего анализа существенно, что все эти образы и их закономерные связи могут быть получены в соответствии с принципом отыскания математически простейших понятий и связей между ними. Число математически возможных простых типов полей и простых уравнений, возможных между ними, ограничено; на этом основана надежда теоретиков на то, что они смогут понять реальность во всей ее глубине.

Наиболее трудным пунктом для развития подобной полевой теории пока является трактовка атомистической структуры вещества и энергии. Дело в том, что эта теория в основе своей не атомистична, поскольку она оперирует исключительно с непрерывными функциями пространства, в противоположность классической механике, наиболее важный элемент которой — материальная точка — уже сам по себе оправдывает атомистическую структуру вещества.

Современная квантовая теория в той ее форме, которая связана с именами де Бройля, Шрёдингера и Дирака и которая оперирует с непрерывными функциями, преодолела эту трудность путем смелой интерпретации; последняя впервые в ясной форме была дана

Максом Борном. Согласно этой интерпретации, пространственные функции, которые встречаются в уравнениях, не претендуют на то, чтобы быть математической моделью атомистического образования. Предполагается, что эти функции позволяют вычислить только вероятности найти такие образования в известном месте или же в известном состоянии движения, когда производятся соответствующие измерения. Это толкование логически свободно от противоречий, и оно дало значительные результаты. Но, к сожалению, оно вынуждает нас использовать континуум, размерность которого не является размерностью пространства, применяемого в физике до сих пор (а именно — четырехмерной); размерность этого континуума неограниченно возрастает вместе с ростом числа частиц, составляющих рассматриваемую систему. Не могу не признаться в том, что я придавал этой интерпретации только преходящее значение. Я все еще верю в возможность построить такую модель реальности, т. е. такую теорию, которая выражает сами вещи, а не только вероятности их поведения.

С другой стороны, мне кажется несомненным, что мы должны отказаться от идеи точной локализации частиц в теоретической модели. Это кажется мне надежным результатом гейзенберговского соотношения неопределенностей. Но атомистическая теория в собственном смысле слова (а не только на основе интерпретации) в математической модели вполне мыслима и без локализации частиц. Например, чтобы учесть атомистический характер электричества, необходимо из полевых уравнений получить следующий результат: величина электрического заряда в некоторой области трехмерного пространства, на границах которой плотность заряда исчезает повсюду, всегда представляется целым числом. Таким образом, в теории континуума атомистические характеристики могли бы быть удовлетворительно выражены через интегральные законы и без локализации образований, составляющих атомистическую структуру.

Только в том случае, если бы удалось осуществить такое представление атомистической структуры, я считал бы квантовую загадку разрешенной.

1933 г.

Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным?

(Совместно с Б. Подольским и Н. Розеном)

В полной физической теории существует определенный элемент, соответствующий каждому элементу реальности. Достаточным условием реальности той или иной физической величины является возможность предсказания ее с достоверностью, не нарушая системы. В квантовой механике в случае двух физических величин, описываемых некоммутирующими операторами, знание одной из этих величин делает невозможным знание другой. Тогда, либо 1) описание реальности в квантовой механике с помощью волновой функции является неполным, либо 2) эти две физические величины не могут одновременно обладать реальностью. Рассмотрение проблемы предсказания поведения некоторой системы на основе измерений, выполненных над другой системой, которая предварительно взаимодействовала с рассматриваемой, приводит к результату, что если утверждение «1» неверно, то утверждение «2» также неверно. Таким образом, это приводит к заключению, что описание физической реальности с помощью волновой функции является неполным.

1

При анализе физической теории необходимо учитывать различие между объективной реальностью, которая не зависит ни от какой теории, и теми физическими понятиями, с которыми оперирует теория. Эти понятия вводятся в качестве элементов, которые должны соответствовать объективной реальности, и с помощью этих понятий мы и представляем себе эту реальность.

Для суждения об успехе физической теории мы можем задать себе два вопроса: 1) правильна ли теория? и 2) является ли даваемое

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be considered complete? (With B. Podolsky and N. Rosen). Phys. Rev., 1935, 47, 777–780.

теорией описание полным? Только в том случае, если на оба эти вопроса можно дать положительные ответы, концепции теории могут быть признаны удовлетворительными. Первый вопрос — о правильности теории — решается в зависимости от степени согласия между выводами теории и человеческим опытом. Этот опыт, который только и позволяет нам делать заключение о действительности, в физике принимает форму эксперимента и измерения. Мы хотим рассмотреть здесь, имея в виду квантовую механику, второй из поставленных выше вопросов.

Какой бы смысл ни вкладывался в термин «*полное описание*», от всякой полной теории, как нам кажется, необходимо требовать следующее: *каждый элемент физической реальности должен иметь отражение в физической теории*. Мы будем называть это условием полноты. Таким образом, на второй вопрос легко ответить, если мы сможем выяснить, что является элементами физической реальности.

Элементы физической реальности не могут быть определены при помощи априорных философских рассуждений; они должны быть найдены на основе результатов экспериментов и измерений. Однако для наших целей нет необходимости давать исчерпывающее определение реальности. Мы удовлетворимся следующим критерием, который считаем разумным. *Если мы можем, без какого бы то ни было возмущения системы, предсказать с достоверностью* (т. е. вероятностью, равной единице) *значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине*. Нам кажется, что этот критерий, хотя он далеко не исчерпывает всех возможных способов распознавания физической реальности, по крайней мере дает нам один из таких способов, коль скоро выполняются сформулированные в нем условия. Этот критерий, рассматриваемый не как необходимое, а только лишь как достаточное условие реальности, находится в согласии как с классическим, так и с квантовомеханическим представлением о реальности.

Чтобы проиллюстрировать нашу мысль, рассмотрим квантовомеханическое описание поведения частицы, имеющей одну степень свободы. Основное понятие — это понятие *состояния*, которое по предположению полностью характеризуется волновой функцией ψ . Последняя является функцией переменных, выбранных для описания поведения частицы. Каждой физически наблюдаемой величине A ставится в соответствие оператор, который можно обозначить той же буквой.

Если ψ есть собственная функция оператора A , т. е., если

$$\psi' \equiv A\psi = a\psi, \quad (1)$$

где a — число, то физическая величина A имеет с достоверностью значение a , коль скоро частица находится в состоянии ψ . Если ψ удовлетворяет уравнению (1), то согласно нашему критерию реальности для частицы в состоянии ψ существует элемент физической реальности, соответствующий физической величине A . Пусть, например,

$$\psi = e^{\frac{2\pi i}{h} p_0 x}, \quad (2)$$

где h — постоянная Планка, p_0 — некоторое постоянное число и x — независимая переменная. Так как оператор, соответствующий количеству движения частицы, имеет вид

$$p = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x}, \quad (3)$$

то мы получаем:

$$\psi' = p\psi = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial \psi}{\partial x} = p_0 \psi. \quad (4)$$

Таким образом, в состоянии, которое определяется уравнением (2), количество движения имеет с достоверностью значение p_0 . Значит, в этом случае имеет смысл говорить, что количество движения частицы в состоянии ψ реально.

С другой стороны, если уравнение (1) не выполняется, мы больше не можем говорить о том, что физическая величина A имеет определенное значение. Так обстоит дело, например, с координатой частицы. Оператор q , соответствующий координате, есть оператор умножения на независимую переменную. Таким образом,

$$q\psi = x\psi \neq a\psi. \quad (5)$$

Согласно квантовой механике мы только можем сказать, что относительная вероятность того, что измерение координаты даст результат, лежащий между a и b , равна

$$P(a, b) = \int_a^b \bar{\psi} \psi dx = \int_a^b dx = b - a. \quad (6)$$

Так как эта вероятность не зависит от a , а зависит только от разности $b - a$, мы видим, что все значения координаты равновероятны.

Итак, для частицы в состоянии ψ [формула (2)] определенного значения координаты предсказать нельзя, а его можно получить

только путем непосредственного измерения. Такое измерение вызовет, однако, возмущение частицы, и, таким образом, изменит ее состояние. После того как координата будет определена, частица уже не будет больше находиться в состоянии, задаваемом формулой (2). Обычно в квантовой механике из этого делается следующий вывод: *если количество движения частицы известно, то ее координата не имеет физической реальности.*

В квантовой механике доказывается и более общее положение: если операторы, соответствующие двум физическим величинам, скажем A и B , не коммутируют, т. е. если $AB \neq BA$, то точное знание одной из этих величин исключает точное знание другой. Кроме того, каждая попытка экспериментально определить вторую величину будет менять состояние таким образом, что уничтожит знание первой.

Из этого следует, что или 1) *квантовомеханическое описание реальности посредством волновой функции неполно* или 2) *когда операторы, соответствующие двум физическим величинам, не коммутируют, эти две величины не могут одновременно быть реальными.* Ибо, если бы обе они одновременно были реальными, и, следовательно, имели определенные значения, то эти значения должны были бы по условию полноты содержаться в полном описании. Значит, если бы волновая функция обеспечивала полное описание реальности, то оно должно было бы включать эти значения, и их можно было бы предсказывать. Так как это не имеет места, то мы остаемся перед сформулированной выше альтернативой.

В квантовой механике обычно предполагается, что волновая функция действительно дает полное описание физической реальности для системы в состоянии, которому она соответствует. На первый взгляд это предположение вполне приемлемо, так как информация, которая может быть получена из знания волновой функции, кажется точно соответствующей той, которую можно получить при помощи измерений, не изменяя состояния системы. Мы покажем, однако, что это предположение вместе с данным выше критерием реальности приводит к противоречию.

2

Для этой цели вообразим себе, что имеются две системы I и II, которым мы даем взаимодействовать от момента времени $t = 0$ до $t = T$, после чего между обеими частями уже не происходит никакого взаимодействия. Кроме того, мы предположим, что состояния обеих систем до $t = 0$ были известны. Мы можем тогда вычислить с помощью уравнения Шрёдингера состояние объединенной системы I + II во всякий последующий момент времени, в частности для любого $t > T$.

Обозначим соответствующую волновую функцию через Ψ . Мы не можем, однако, вычислить того состояния, в котором каждая из двух систем останется после взаимодействия. Согласно квантовой механике это состояние может быть найдено только с помощью последующих измерений, путем процесса, известного под названием «редукции волнового пакета». Рассмотрим сущность этого процесса.

Пусть a_1, a_2, a_3, \dots — собственные значения некоторой физической величины A , относящейся к системе I, и $u_1(x_1), u_2(x_1), u_3(x_1), \dots$ — соответствующие собственные функции, причем x_1 обозначает совокупность переменных, которые служат для описания первой системы. Тогда Ψ , рассматриваемая как функция от x_1 , может быть выражена в виде ряда

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(x_2) u_n(x_1), \quad (7)$$

где x_2 обозначает переменные, которые служат для описания второй системы. Здесь величины $\psi_n(x_2)$ должны рассматриваться просто как коэффициенты разложения Ψ в ряд по ортогональным функциям $u_n(x)$. Предположим теперь, что величина A измерена, причем найдено, что она имеет значение a_k . Отсюда выводят заключение, что после измерения первая система остается в состоянии, описываемом волновой функцией $u_k(x_1)$, тогда как вторая система — в состоянии с волновой функцией $u_k(x_2)$. Это и есть процесс редукции волнового пакета: волновой пакет, задаваемый бесконечным рядом (7), сводится к одному члену $\psi_k(x_2) u_k(x_2)$.

Последовательность функций $u_n(x_1)$ определяется выбором физической величины A . Если вместо нее мы выбрали бы другую величину, скажем B , имеющую собственные значения b_1, b_2, b_3, \dots и собственные функции $v_1(x_1), v_2(x_1), v_3(x_1), \dots$, мы бы получили вместо соотношения (7) разложение

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(x_2) v_s(x_1), \quad (8)$$

где величины $\varphi_s(x_2)$ представляют собой новые коэффициенты. Если теперь измеряется величина B , причем она оказывается равной b_r , то мы заключаем, что после измерения первая система остается в состоянии, которое описывается функцией $v_r(x_1)$, а вторая система остается в состоянии, которое описывается функцией $\varphi_r(x_2)$.

Мы видим поэтому, что в результате двух различных измерений, произведенных над первой системой, вторая система может оказаться в двух разных состояниях, описываемых различными волновыми функциями. С другой стороны, так как во время измерения эти две системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было

операций над первой системой во второй системе уже не может получиться никаких реальных изменений. Это, конечно, является лишь другой формулировкой того, что понимается под отсутствием взаимодействия между двумя системами. Таким образом, *одной и той же реальности* (вторая система после взаимодействия с первой) *можно сопоставить две различные функции* (в нашем примере ψ_k и φ_r).

Но ведь может случиться, что две волновые функции ψ_k и φ_r являются собственными функциями двух некоммутирующих операторов, соответствующих некоторым физическим величинам P и Q . Что такой случай действительно возможен, лучше всего можно показать на примере. Предположим, что две системы являются двумя частицами и что функция $\Psi(x_1, x_2)$ равна

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{2\pi i}{h}(x_1 - x_2 + x_0)p} dp, \quad (9)$$

где x_0 — некоторая постоянная. Пусть величиной A будет количество движения первой частицы; тогда, как мы знаем из уравнения (4), ее собственные функции, соответствующие собственному значению p , будут

$$u_p(x_1) = e^{\frac{2\pi i}{h}px_1}. \quad (10)$$

Так как мы имеем здесь случай непрерывного спектра, разложение (7) переписывается в виде

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_p(x_2) u_p(x_1) dp, \quad (11)$$

где

$$\psi_p(x_2) = e^{-\frac{2\pi i}{h}(x_2 - x_0)p}. \quad (12)$$

Но ψ_p является собственной функцией оператора

$$P = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x_2}, \quad (13)$$

соответствующей собственному значению количества движения второй частицы — p . С другой стороны, если величина B есть координата первой частицы, то ее собственной функцией, соответствующей собственному значению x , будет

$$v_x(x_1) = \delta(x_1 - x), \quad (14)$$

где $\delta(x_1 - x)$ — известная дельта-функция Дирака. Соотношение (8) в этом случае принимает вид

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_x(x_2) v_x(x_1) dx, \quad (15)$$

где

$$\varphi_x(x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{2\pi i}{h}(x-x_2+x_0)p} dp = h\delta(x-x_2+x_0). \quad (16)$$

Но φ_x является собственной функцией оператора

$$Q = x_2, \quad (17)$$

соответствующей собственному значению $x + x_0$ координаты второй частицы. Так как

$$PQ - QP = \frac{h}{2\pi i}, \quad (18)$$

то мы показали, что, вообще говоря, возможен случай, когда ψ_k и φ_r являются собственными функциями двух некоммутирующих операторов, соответствующих двум физическим величинам.

Вернемся теперь к общему случаю, к которому относятся соотношения (7) и (8). Мы предположим, что ψ_k и φ_r действительно являются собственными функциями некоторых некоммутирующих операторов P и Q , причем ψ_k соответствует собственному значению p_k , а φ_r соответствует собственному значению q_r . В таком случае, измерив A и B , мы сможем предсказать с достоверностью и без какого бы то ни было возмущения второй системы либо значение величины P (т. е. p_k), либо значение величины Q (т. е. q_r). Согласно нашему критерию реальности в первом случае мы должны считать элементом реальности величину P , а во втором случае элементом реальности будет величина Q . Но, как мы видели, обе волновые функции ψ_k и φ_r относятся к одной и той же реальности.

Выше мы показали, что или 1) квантовомеханическое описание реальности посредством волновой функции не является полным или 2) если операторы, соответствующие двум физическим величинам, не коммутируют, эти две величины не могут одновременно обладать реальностью. Исходя затем из предположения, что волновая функция действительно дает полное описание физической реальности, мы пришли к выводу, что две физические величины с некоммутирующими операторами могут быть реальными одновременно. Таким образом, отрицание «1» приводит к отрицанию единственного остающегося предположения «2». Итак, мы вынуждены заключить, что квантовомеханическое

описание физической реальности посредством волновых функций не является полным.

На это заключение можно было бы возражать, основываясь на том, что наш критерий реальности не является достаточно ограничивающим. Действительно, мы бы не пришли к нашему заключению, если бы настаивали на том, что две или больше физических величины могут одновременно считаться элементами реальности *только в том случае, если их можно одновременно измерить или предсказать*. С этой точки зрения величины P и Q одновременно не обладают реальностью, поскольку предсказать можно либо P , либо Q , но не P и Q одновременно. Здесь реальность P и Q ставится в зависимость от процесса измерения, производимого над первой системой, хотя этот процесс никоим образом не влияет на вторую систему. Никакое разумное определение реальности не должно, казалось бы, допускать этого.

Хотя мы и показали, что волновая функция не дает полного описания физической реальности, мы оставили открытым вопрос о том, существует ли такое описание или нет. Мы думаем, однако, что такая теория возможна.

1935 г.

Н. Бор

Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным

В своей недавней статье под тем же заглавием (в нашем сборнике это предыдущая публикация — *Ред.*) А. Эйнштейн, Б. Подольский и Н. Розен приводят аргументы, которые побудили их ответить на поставленный в заголовке вопрос в отрицательном смысле. Однако мне кажется, что общий ход их рассуждений не вполне соответствует тому положению вещей, с которым мы встречаемся в атомной физике. Я охотно воспользуюсь поэтому представившимся поводом, чтобы разъяснить несколько подробнее одну общую точку зрения, которую удобно называть «дополнительностью». С этой точки зрения, на которую я неоднократно уже указывал, квантовая механика в пределах своей области применимости представляется вполне рациональным описанием тех физических явлений, с которыми мы встречаемся при изучении атомных процессов.

Вопрос о том, в каких пределах можно приписать однозначный смысл такому выражению, как «физическая реальность», не может быть, разумеется, решен на основе априорных философских соображений. Как подчеркивают сами авторы названной статьи, для решения этого вопроса нужно обратиться непосредственно к опытам и измерениям. С этой целью они предлагают некоторый «критерий реальности», формулируемый ими следующим образом: «Если мы можем без какого бы то ни было возмущения системы предсказать с достоверностью значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине». На интересном примере, к которому мы еще вернемся, они затем показывают следующее. В квантовой механике, так же как и в классической, значение любой переменной может быть при известных условиях предсказано на основании измерений, произведенных целиком над другими системами, бывшими ранее во взаимодействии с данной системой. Опираясь на свой

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be considered complete? *Phys. Rev.*, 1935, 48, 696–702.

критерий, авторы стремятся поэтому приписать элемент реальности каждой из величин, представленных этими переменными. Но, с другой стороны, характерной чертой существующей математической формулировки квантовой механики является, как известно, то, что если мы имеем две канонически сопряженные величины, то при описании состояния механической системы невозможно приписать им обоим определенные значения. В силу этого они считают существующую математическую формулировку неполной и выражают убеждение, что можно построить более удовлетворительную теорию.

Однако такого рода аргументация едва ли пригодна для того, чтобы подорвать надежность квантовомеханического описания, основанного на стройной математической теории, которая автоматически охватывает все случаи измерения, подобные указанному*. Кажущееся противоречие

* В этом отношении выводы цитируемой статьи можно рассматривать как непосредственные следствия теорем о каноническом преобразовании в квантовой механике. Эти теоремы обеспечивают ее математическую полноту и рациональное соответствие с классической механикой, быть может, в большей мере, чем какая-либо другая черта этой теории. В самом деле, пусть мы имеем механическую систему, состоящую из двух подсистем (1) и (2), которые могут взаимодействовать между собой, но могут и не взаимодействовать. При описании такого рода системы всегда возможно заменить любые две пары канонически сопряженных переменных, относящихся соответственно к (1) и (2) и удовлетворяющих обычным перестановочным соотношениям

$$\begin{cases} [q_1, p_1] = [q_2, p_2] = \frac{i\hbar}{2\pi}, \\ [q_1, q_2] = [p_1, p_2] = [q_1, q_2] = [q_2, p_1] = 0, \end{cases}$$

двумя парами новых канонически сопряженных переменных (Q_1, P_1) (Q_2, P_2) , связанных с первоначальными простым ортогональным преобразованием, соответствующим вращению на угол θ в плоскостях (q_1, q_2) и (p_1, p_2) , а именно

$$\begin{cases} q_1 = Q_1 \cos \theta - Q_2 \sin \theta, & p_1 = P_1 \cos \theta - P_2 \sin \theta, \\ q_2 = Q_1 \sin \theta + Q_2 \cos \theta, & p_2 = P_1 \sin \theta + P_2 \cos \theta, \end{cases}$$

Ввиду того, что эти переменные удовлетворяют аналогичным перестановочным соотношениям, в частности

$$[Q_1, P_1] = \frac{i\hbar}{2\pi}, \quad [Q_1, P_2] = 0,$$

очевидно, что при описании состояния составной системы нельзя приписывать определенных значений величинам Q_1 и P_1 , но что их можно приписывать величинам Q_1 и P_2 . В этом случае из выражений для этих переменных через (q_1, p_1) и (q_2, p_2) , а именно из

$$Q_1 = q_1 \cos \theta + q_2 \sin \theta, \quad P_2 = -p_1 \sin \theta + p_2 \cos \theta,$$

вытекает, далее, что последующее измерение одной из величин q_1 или p_2 позволит нам предсказать наперед значение q_1 или, соответственно, p_1 .

на самом деле вскрывает только существенную непригодность обычной точки зрения натуральной философии для описания физических явлений того типа, с которым мы имеем дело в квантовой механике. В самом деле, конечность взаимодействия между объектом и измерительным прибором, обусловленная самим существованием кванта действия, влечет за собой — вследствие невозможности контролировать обратное действие объекта на измерительный прибор (а эта невозможность будет непременно иметь место, если только прибор удовлетворяет своему назначению) — необходимость окончательного отказа от классического идеала причинности и радикальный пересмотр наших взглядов на проблему физической реальности. Как мы увидим ниже, всякий критерий реальности, подобный предложенному упомянутыми авторами, будет — какой бы осторожной ни казалась его формулировка — содержать существенную неоднозначность, если мы станем его применять к действительным проблемам, которые нас здесь интересуют.

Чтобы придать рассуждениям, которые мы приведем в подтверждение этого положения, возможно большую ясность, я сперва рассмотрю довольно подробно несколько простых примеров измерительных установок.

Начнем с простого случая частицы, проходящей через щель диафрагмы, которая может составлять часть более или менее сложной экспериментальной установки. Даже если бы количество движения этой частицы до ее падения на диафрагму было вполне известно, дифракция плоской волны (дающей символическое представление состояния частицы) от краев щели повлечет за собой неопределенность в количестве движения частицы после ее прохождения через диафрагму, причем эта неопределенность будет тем больше, чем уже щель. Но ширину щели (по крайней мере, если она все еще велика по сравнению с длиной волны) можно принять за меру неопределенности Δq в положении частицы относительно диафрагмы в направлении, перпендикулярном к щели. Далее из де-Бройлевского соотношения между количеством движения и длиной волны легко усмотреть, что неопределенность Δp в количестве движения частицы в этом направлении связана с Δq соотношением Гейзенберга

$$\Delta p \Delta q \sim h,$$

которое, как можно показать, пользуясь математическим аппаратом квантовой механики, является непосредственным следствием перестановочных соотношений для любой пары канонически сопряженных переменных. Очевидно, что неопределенность Δp неразрывно связана с обменом количеством движения между

частицей и диафрагмой. Для наших рассуждений фундаментальную важность приобретает в связи с этим вопрос о том, в какой мере может быть учтено переданное таким образом количество движения, в какой мере оно может быть принято во внимание при описании того явления, которое мы изучаем при помощи данной постановки опыта, первым этапом которого можно считать прохождение частицы через диафрагму.

Соответственно обычной постановке опытов над замечательным явлением дифракции электронов предположим сперва, что наша диафрагма, так же как и другие части прибора, например, вторая диафрагма с несколькими щелями, параллельными первой, и фотографическая пластинка, жестко связаны с подставкой, которая и определяет пространственную систему отсчета. Тогда количество движения, передаваемое частицей диафрагме, а также и другим частям прибора, будет уходить в их общую подставку. Таким образом, в этом случае мы сознательно отказываемся от всякой возможности учитывать реакцию частицы на отдельные части прибора и принимать эти реакции в расчет в наших предсказаниях, относящихся к окончательному результату опыта, например, к положению того пятна, которое частица производит на фотографической пластинке.

Невозможность более подробного анализа взаимодействий, происходящих между частицей и измерительным прибором, не является, очевидно, особенностью именно данной постановки опыта, но представляет существенное свойство всякой постановки, пригодной для изучения явлений рассматриваемого типа, в которых мы сталкиваемся со своеобразной чертой *индивидуальности*, совершенно чуждой классической физике. В самом деле, если бы у нас была какая-нибудь возможность учитывать количество движения, передаваемое частицей отдельным частям прибора, то это сразу позволило бы нам выводить заключения, относящиеся к «ходу» такого рода явлений. Например, мы могли бы тогда указать, через какую именно щель во второй диафрагме прошла частица на своем пути к фотографической пластинке, а это никак нельзя согласовать с тем фактом, что вероятность попадания частицы на данный участок поверхности пластинки определяется не наличием той или иной щели в отдельности, а расположением всех щелей во второй диафрагме, которых может достигнуть сопоставляемая частице волна, претерпевшая дифракцию от щели в первой диафрагме.

Но мы могли бы воспользоваться другой экспериментальной установкой, в которой первая диафрагма уже не будет жестко связана с остальными частями прибора. В такой установке мы имели

бы по крайней мере принципиальную* возможность измерить с любой желаемой точностью количество движения диафрагмы до и после прохождения частицы, а значит, и указать наперед количество движения последней после ее прохождения через щель. В самом деле, такого рода измерения предполагают только возможность однозначного применения классического закона сохранения количества движения, причем применять его нужно, например, к процессу столкновения между диафрагмой и каким-нибудь пробным телом, количество движения которого надлежащим образом контролируется до и после столкновения. Правда, такого рода контроль будет существенно зависеть от изучения хода в пространстве и времени такого процесса, к которому были бы применены представления классической механики; однако если все пространственные размеры и промежутки времени взяты достаточно большими, то это, очевидно, не связано ни с какими ограничениями точности в определении количества движения пробных тел, а связано только с отказом от точного контроля их локализации в пространстве и времени. Последнее обстоятельство представляет полную аналогию с тем отказом от учета количества движения закрепленной диафрагмы, с которой мы встретились выше при обсуждении первоначальной установки. Такого рода отказ обусловлен, в конце концов, требованием чисто классического описания измерительного прибора; это требование влечет за собой необходимость ввести в описание действия прибора известные допуски, соответствующие соотношениям неопределенности квантовой механики.

Но наиболее существенная разница между обеими рассмотренными нами экспериментальными установками заключается в следующем. В той установке, которая пригодна для измерения количества движения первой диафрагмы, мы уже не можем использовать эту диафрагму как измерительный прибор и употреблять ее с той же целью, как в первоначальной установке. Поскольку мы интересуемся положением диафрагмы относительно остального прибора, мы уже должны считать ее, как и частицу, проходящую через щель, объектом исследования; это значит, что мы должны явным образом принять во внимание квантовомеха-

* Очевидная невозможность на самом деле осуществить с имеющейся экспериментальной техникой измерительные приемы, подобные разбираемым здесь и в дальнейшем, разумеется, ни в какой мере не подрывает справедливости наших теоретических рассуждений. Ведь эти приемы по существу эквивалентны применению атомных процессов, подобных явлению Комптона, для которых приложимость закона сохранения количества движения хорошо установлена.

нические соотношения неопределенности для ее положения и количества движения. В самом деле, даже если бы мы знали то положение (относительно пространственной системы отсчета, т. е. подставки), которое занимала диафрагма до первого измерения ее количества движения, и даже если бы мы точно установили ее положение после второго измерения, то все же, пользуясь второй установкой, мы теряем возможность судить о положении диафрагмы в тот момент, когда через щель проходила частица; это происходит потому, что в каждом процессе столкновения диафрагмы с пробными телами она подвергается смещению, которое не поддается контролю. Поэтому вся наша установка в ее втором варианте, очевидно, непригодна для изучения тех явлений, которые изучались при помощи ее первого варианта. В частности, можно показать следующее. Предположим, что количество движения первой диафрагмы измерено с точностью, достаточной, чтобы судить о том, прошла или нет частица через какую-либо определенную щель во второй диафрагме. В таком случае даже минимальная неопределенность в положении первой диафрагмы, совместная с наличием такого рода сведений о ее количестве движения, сотрет всю интерференционную картину, определяющую расположение тех зон на фотографической пластинке, куда возможно попадание частицы. Между тем, наличие нескольких щелей во второй диафрагме непременно привело бы к такого рода интерференционному эффекту, если бы взаимное расположение всех частей прибора было фиксировано.

Предположим, что мы пользуемся установкой, пригодной для измерения количества движения первой диафрагмы. Ясно, что, даже если мы измерили это количество движения до прохождения частицы через щель, мы имеем после этого прохождения *свободный выбор* между двумя возможностями, а именно мы можем задаться целью узнать либо количество движения частицы, либо ее начальное положение по отношению к остальной части прибора. В первом случае нам достаточно произвести еще одно определение количества движения диафрагмы, тем самым лишив себя навсегда возможности узнать ее точное положение в то время, когда через нее проходила частица. Во втором случае нам достаточно определить положение диафрагмы относительно системы отсчета, с чем сопряжена потеря возможности учесть количество движения, переданное диафрагме частицей. Если диафрагма обладает достаточно большой массой по сравнению с массой частицы, мы можем даже сделать так, чтобы после первого определения количества движения диафрагмы она оставалась в покое в

некотором неизвестном положении относительно других частей прибора; тогда последующая фиксация положения может просто состоять в установлении жесткой связи между диафрагмой и подставкой.

Если я повторял здесь эти простые и, по существу, хорошо известные соображения, то я руководствовался при этом желанием подчеркнуть следующее. В рассматриваемых явлениях мы имеем дело отнюдь не с каким-либо неполным описанием, с произвольным выхватыванием разных элементов физической реальности за счет других таких элементов, но с рациональным проведением различия между существенно разными экспериментальными установками и процессами измерения, из которых одни допускают однозначное применение понятия пространственной локализации, а другие — законное применение теоремы о сохранении количества движения. Если и остается какой-нибудь произвол, то он относится только к нашей свободе выбора и использования различных измерительных приборов, характерной для самого понятия об эксперименте. С каждой постановкой опыта связан отказ от одной из двух сторон описания физических явлений; эти две стороны будут здесь как бы *дополнительными* одна к другой, тогда как их сочетание характеризует методы классической физики. Отказ этот существенно обусловлен тем, что в области квантовых явлений невозможен точный учет обратного действия объекта на измерительные приборы, т. е. учет переноса количества движения в случае измерения положения и учет смещения в случае измерения количества движения. В связи с этим никакие сравнения и аналогии между квантовой механикой и обыкновенной статистической механикой никогда не смогут передать сути дела — как бы ни были полезны такие аналогии для формального изложения теории. Ведь в каждой постановке опыта, пригодной для изучения собственно квантовых явлений, мы сталкиваемся не только с незнанием значений некоторых физических величин, но и с невозможностью дать этим величинам однозначное определение.

Последние замечания в равной мере относятся и к той упомянутой выше частной задаче, которая была рассмотрена Эйнштейном, Подольским и Розеном. Эта задача не требует более сложных рассуждений, чем те простые примеры, которые были рассмотрены нами выше. Тот частный случай квантовомеханического состояния двух свободных частиц, для которого эти авторы дают явное аналитическое выражение, может быть воспроизведен, по крайней мере принципиально, при помощи простой экспериментальной установки; установка эта состоит из жесткой

диафрагмы с двумя параллельными щелями, весьма узкими по сравнению с расстоянием между ними, причем сквозь каждую из этих щелей проходит независимо друг от друга по одной частице с заранее измеренным количеством движения. Если измерить количество движения этой диафрагмы до и после прохождения частиц, то мы действительно будем знать, во-первых, сумму составляющих количества движения обеих частиц в направлении, перпендикулярном к щелям, и, во-вторых, разность их начальных координат, отсчитываемых в том же направлении. При этом канонически сопряженные величины, т. е. разность составляющих их количества движения и сумма их координат, останутся, конечно, совершенно неизвестными*. При таком расположении опыта ясно, что если затем произвести единственное измерение либо положения, либо количества движения одной из частиц, то тем самым будет автоматически определено с любой желаемой точностью положение или, соответственно, количество движения другой частицы; это будет по крайней мере в том случае, если длина волны, соответствующая свободному движению каждой из частиц, достаточно мала по сравнению с шириной щелей. Как указано названными авторами, на этой стадии опыта мы имеем полную возможность свободно выбирать тот или иной вариант опыта, смотря по тому, какую из названных величин мы желаем определить, причем ни в том, ни в другом варианте мы не трогаем непосредственно ту частицу, которой мы интересуемся.

Та «свобода выбора», которую предоставляет нам эта постановка опыта, как раз и означает, что нам надлежит остановиться *на одной из двух разных экспериментальных манипуляций, допускающих однозначное применение одного из двух дополнительных классических понятий*, — все это совершенно так же, как в разобранный выше простом случае одной частицы, прошедшей через щель диафрагмы, где мы могли выбирать между манипуляциями, нужными для предсказания ее положения и количества движения. В самом деле, измерить положение одной из частиц означает не что иное как установить, как она будет себя вести по отношению к какому-нибудь прибору, неподвижно скрепленному

* Это описание будет, очевидно, соответствовать с точностью до несущественного нормировочного множителя как раз тому преобразованию переменных, которое было приведено в одном из предыдущих примечаний, где (q_1, p_1) , (q_2, p_2) должны обозначать координаты и составляющие количества движения обеих частиц и угол θ должен равняться $-\pi/4$. Заметим также, что волновая функция, приведенная в формуле (9) цитированной выше статьи, соответствует частному случаю $P_2 = 0$ и предельному случаю двух бесконечно узких щелей.

с подставкой, определяющей пространственную систему отсчета. В описанных выше условиях опыта такого рода измерение дает нам также знание того положения, которое занимала относительно этой системы отсчета наша диафрагма после того, как частицы прошли сквозь щели, тогда как без такого измерения положение диафрагмы остается совершенно неизвестным. Очевидно, что только таким путем мы получим данные, позволяющие сделать заключения о начальном положении другой частицы по отношению к остальному прибору. Но зато допустив существенно неопределенный перенос количества движения от первой частицы к упомянутой подставке, мы тем самым лишили себя всякой будущей возможности применять закон сохранения количества движения к системе, состоящей из диафрагмы и обеих частиц, а значит, потеряли ту единственную основу, которая могла позволить нам однозначно применить понятие количества движения к предсказаниям, относящимся к поведению второй частицы. И наоборот, если бы мы пожелали измерить количество движения одной из частиц, мы потеряли бы вследствие неизбежного в таком измерении и не поддающегося учету смещения всякую возможность судить по поведению этой частицы о положении диафрагмы относительно остального прибора и лишили бы себя всякой основы для предсказаний, относящихся к локализации другой частицы.

С нашей точки зрения мы видим теперь, что формулировка упомянутого выше критерия физической реальности, предложенного Эйнштейном, Подольским и Розеном, содержит двусмысленность в выражении «без какого бы то ни было возмущения системы». Разумеется, в случае, подобном только что рассмотренному, нет речи о том, чтобы в течение последнего критического этапа процесса измерения изучаемая система подвергалась какому-либо механическому возмущению. Но и на этом этапе речь идет, по существу, о возмущении в смысле *влияния на самые условия, определяющие возможные типы предсказаний будущего поведения системы*. Так как эти условия составляют существенный элемент описания всякого явления, к которому можно применять термин «физическая реальность», то мы видим, что аргументация упомянутых авторов не оправдывает их заключения о том, что квантовомеханическое описание существенно неполно. Напротив, как вытекает из наших предыдущих рассуждений, это описание может быть характеризовано как разумное использование всех возможностей однозначного толкования измерений, совместимого с характерным для квантовых явлений конечным и не поддающимся учету взаимодействием между объектом и измерительными приборами. В самом деле, только взаимное исключение всяких двух экспериментальных ма-

нипуляций, которые позволили бы дать однозначное определение двух взаимно дополнительных физических величин, — только это взаимное исключение и освобождает место для новых физических законов, совместное существование которых могло бы на первый взгляд показаться противоречащим основным принципам построения науки. Именно эту совершенно новую ситуацию в отношении описания физических явлений мы и пытались характеризовать термином *дополнительность*.

Исследованные нами до сих пор постановки опытов отличаются особой простотой в том отношении, что в описании рассмотренных явлений понятие времени играет второстепенную роль. Правда, мы неоднократно пользовались такими выражениями, как «до» и «после», подразумевающими связь во времени; но в каждом таком случае нужно иметь в виду соответствующую неточность. Эта неточность будет, однако, несущественной до тех пор, пока промежутки времени, с которыми мы имеем дело, будут достаточно велики по сравнению с теми собственными периодами, которые связаны с данным явлением и которые обнаруживаются при более детальном анализе. Но как только мы приступаем к более точному описанию хода квантовых явлений во времени, мы наталкиваемся на известные новые парадоксы, для разъяснения которых нужно принять во внимание дальнейшие особенности взаимодействия между объектами и измерительными приборами. В самом деле, в такого рода явлениях мы имеем дело уже не с такими экспериментальными установками, в которых все существенные части прибора неподвижны друг относительно друга, а с установками, содержащими подвижные части, подобные затворам, открывающим и закрывающим щели диафрагм, причем эти части контролируются механизмами, играющими роль часов. Кроме уже рассмотренного выше переноса количества движения между объектом и телами, определяющими пространственную систему отсчета, нам придется теперь при изучении такого рода установок исследовать возможный обмен энергией между объектом и этими «часовыми» механизмами.

Решающий пункт в рассуждениях, относящихся к измерениям времени в квантовой механике, вполне аналогичен тому аргументу, который относится к измерениям положения. Подобно тому, как перенос количества движения отдельным частям прибора, относительно положение которых требуется знать для описания явления, оказывается, как мы видели, совершенно не поддающимся контролю, совершенно так же невозможно проанализировать и обмен энергией между объектом и различными телами, относительно движение которых должно быть известным для желаемого использования прибора. Действительно, *возможность*

контролировать передаваемую часам энергию, не нарушая действия их как указателей времени, принципиально исключена. В самом деле, пользование часами как указателями времени всецело основано на предполагаемой возможности применения методов классической физики к описанию действия каждого часа и способов поверки их по другим часам. В этом описании мы, очевидно, должны вводить в баланс энергии некоторый допуск, соответствующий квантовомеханическим соотношениям неопределенности между каноническими сопряженными переменными — энергией и временем. В конце концов, именно это обстоятельство и влечет за собой соотношение дополненности между всяким подробным описанием хода атомных процессов во времени, с одной стороны, и теми чуждыми классической механике свойствами внутренней устойчивости атомов, которые были раскрыты при изучении переноса энергии в атомных реакциях — с другой. Положение вещей здесь совершенно то же, как в рассмотренном выше вопросе о взаимно исключающем характере всякого однозначного применения к квантовым явлениям понятий положения и количества движения.

Как мы видели, в каждой экспериментальной установке необходимо проводить границу между теми частями рассматриваемой физической системы, которые мы причисляем к измерительным приборам, и теми, которые являются объектами, подлежащими исследованию. Можно сказать, что необходимость такого рода разграничения и составляет *принципиальное различие между классическим и квантовомеханическим описанием физических явлений.* Правда, в пределах каждого измерительного процесса мы можем провести эту границу по желанию в том или ином месте; выбор места определяется как в классическом, так и в квантовом случае главным образом соображениями удобства. Однако в то время как в классической физике выбор того или иного места для границы между объектом и измерительным прибором не связан с какими-либо изменениями в характере описания изучаемых физических явлений, в квантовой теории он влечет за собой изменения в этом описании. Фундаментальная важность различия между объектом и прибором в квантовой теории обусловлена, как мы видели, тем, что для толкования всех измерений в собственном смысле необходимо пользоваться классическими представлениями, несмотря на то, что классическая теория не может сама по себе объяснить тех новых закономерностей, с которыми мы имеем дело в атомной физике.

Ввиду такого положения вещей не может быть и речи о каком-либо ином однозначном толковании символов квантовой механики, кроме того, которое заключено в известных правилах, относящихся к предсказанию результатов, получаемых при помощи данной

экспериментальной установки, описываемой чисто классическим образом; правила эти находят свое общее выражение в упомянутых выше теоремах о каноническом преобразовании. Обеспечивая надлежащее соответствие квантовой теории с классической, эти теоремы исключают, в частности, всякое внутреннее противоречие в квантовомеханическом описании, которое могло бы возникнуть в связи с переменной места, где проводится граница между объектом и измерительным прибором. В самом деле, очевидным следствием приведенных выше рассуждений является следующее: при любой постановке опыта и любых измерительных манипуляциях выбор места для этой границы возможен лишь в пределах той области, где квантовомеханическое описание данного процесса, по существу, эквивалентно классическому описанию.

В заключение мне хотелось бы отметить то огромное значение, которое имеет преподанный общей теорией относительности урок для вопроса о физической реальности в области квантовой теории. В самом деле, несмотря на все характерные различия между положением вещей в обоих обобщениях классической теории имеется поразительная аналогия, которая неоднократно отмечалась. В частности, только что обсужденное нами обособленное положение, которое занимают в описании квантовых явлений измерительные приборы, представляет близкую аналогию с необходимостью пользоваться и в теории относительности обыкновенным описанием всех измерительных процессов, включая резкое разделение на пространство и время, причем эта необходимость имеет место, несмотря на то, что самой сущностью теории относительности является установление новых физических законов такого рода, что для понимания их мы должны отказаться от привычного разделения понятий пространства и времени*. Характерная для теории относи-

* Именно это обстоятельство совместно с релятивистской инвариантностью квантовомеханических соотношений неопределенности и гарантирует нам совместимость рассуждений, изложенных в настоящей статье, со всеми требованиями теории относительности. Этот вопрос будет рассмотрен подробнее в подготавливаемой к печати работе, где автор рассмотрит, в частности, весьма интересный парадокс, выдвинутый Эйнштейном и относящийся к приложению теории тяготения к измерениям энергии; решение этого парадокса представляет особо поучительную иллюстрацию общности рассуждений, основанных на понятии дополненности. В той же работе будут обсуждены подробнее пространственно-временные измерения в квантовой теории, причем будут приведены все необходимые математические выкладки и схемы экспериментальных установок, словом, все то, что было опущено в настоящей статье, где главное наше внимание было обращено на диалектическую сторону вопроса, поставленного в заголовке.

тельности зависимость всех показаний масштабов и часов от принятой системы отсчета может быть, далее, сравнена с тем не поддающимся контролю обменом количеством движения и энергией между измеряемыми объектами и всеми приборами, определяющими пространственно-временную систему отсчета, который приводит нас в квантовой теории к положению вещей, характеризующему понятие дополнительности. Действительно, эта новая черта естествознания означает радикальный пересмотр наших взглядов на физическую реальность, который может быть поставлен в параллель с тем фундаментальным изменением всех представлений об абсолютном характере физических явлений, который был вызван общей теорией относительности.

1935 г.

Часть 3
ФИЗИКИ И ФИЗИКА

В. Гейзенберг

Теория относительности. Беседа с Эйнштейном

Теория относительности всегда играла в современной физике особую важную роль. В ней впервые была показана необходимость периодического изменения основополагающих принципов физики. Поэтому обсуждение тех проблем, которые были подняты и отчасти решены теорией относительности, существенно необходимо для рассмотрения философских аспектов современной физики. В известном смысле можно сказать, что создание теории относительности — в противоположность квантовой теории — потребовало сравнительно немного времени с момента окончательного осознания трудностей, о которых в данном случае шла речь, до их разрешения. Повторение опыта Майкельсона Морли и Миллером в 1904 году явилось первым надежным доказательством невозможности обнаружить поступательное движение Земли с помощью оптических методов, а решающая работа Эйнштейна появилась менее чем два года спустя. С другой стороны, опыт Морли и Миллера и работа Эйнштейна явились все-таки, пожалуй, лишь последними фазами развития, которое началось гораздо ранее и которое, по-видимому, можно связать с проблемой «электродинамики движущихся сред».

Электродинамика движущихся сред оказалась важным разделом физики и техники с того времени, как начали строить электромоторы. Серьезная трудность выявилась в этой области только тогда, когда Максвелл вскрыл электромагнитную природу световых волн. Эти волны одним существенным свойством отличаются от других, уже известных ранее волн, например от звуковых волн. Они могут распространяться в пустом пространстве. Если звонок заставить звучать в сосуде, из которого откачан воздух, то звук не

Werner Heisenberg. Physik und Philosophie. Frankfurt am Main, 1959; Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik. München, 1969.

достигает пространства вне сосуда. Свет же свободно проходит сквозь безвоздушное пространство. Поэтому предположили, что световые волны можно рассматривать как упругие волны в очень легкой субстанции, называемой эфиром, которую нельзя ни видеть, ни ощущать, но которая заполняет как безвоздушное пространство, так и пространство, занятое другим веществом, например воздухом или стеклом. Мысль о том, что электромагнитные волны обладают своей собственной реальностью, независимой ни от каких тел, в то время еще не приходила физикам в голову. Так как это гипотетическое вещество — эфир — могло проникать во все другие тела, то встал вопрос: что происходит, если тело приведено в движение? Принимает ли эфир участие в этом движении, и если да, то как распространяется световая волна в этом движущемся эфире?

Эксперименты, которые дают ответ на этот вопрос, трудны по следующей причине: скорости движущихся тел обычно чрезвычайно малы по сравнению со скоростью света. Поэтому движение этих тел может вызвать только очень незначительные эффекты, приблизительно пропорциональные отношению скорости тела к скорости света или более высокой степени этого отношения. Разнообразные эксперименты Вильсона, Роуланда, Рентгена, Эйхенвальда и Физо позволили измерить такие эффекты с точностью, соответствующей первой степени этого отношения. Электронная теория, развитая Лоренцом в 1895 году, дала удовлетворительное описание этих эффектов «первого порядка». Но эксперимент Майкельсона, Морли и Миллера создал новую ситуацию.

Этот эксперимент следует обсудить подробно. Чтобы получить большие эффекты, а тем самым и более точные результаты, казалось целесообразным экспериментировать с телами, движущимися очень быстро. Земля движется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с. Если эфир покоится относительно Солнца и не увлекается Землей, то это быстрое движение эфира относительно Земли с необходимостью должно проявляться в изменении скорости распространения света на Земле. Тогда должны получаться различные значения скорости света, смотря по тому, как распространяется свет — в направлении движения Земли или перпендикулярно к этому направлению. Даже если эфир увлекается Землей частично, должен еще получаться некоторый эффект, так как имел бы место, так сказать, эфирный ветер, и этот эффект должен тогда зависеть, вероятно, от высоты над уровнем моря, на которой проводится эксперимент. Вычисление эффекта, который следует ожидать, показывает, что он в данном случае должен быть очень малым, так как оказывается пропорциональным квадрату отношения скорости Земли к скорости света. Поэтому необходимо

поставить точные эксперименты по интерференции двух световых пучков, один из которых направлен параллельно, а другой — перпендикулярно к направлению движения Земли. Первый эксперимент такого рода, выполненный Майкельсоном в 1881 году, был недостаточно точен. Но и последующие повторные эксперименты не обнаружили ни малейших следов ожидаемого эффекта. Такого рода окончательным доказательством того, что эффект ожидаемого порядка величины не имеет места, являются в особенности эксперименты Морли и Миллера 1904 года.

Их результат казался сначала непонятным, но он имеет отношение и к другому вопросу, незадолго до этого уже обсуждавшемуся физиками. В ньютоновской механике справедлив определенный принцип относительности, который можно характеризовать следующими словами: если в определенной системе отсчета законы ньютоновской механики выполняются для механического движения тела, то это имеет место и в любой другой системе отсчета, движущейся относительно первой системы равномерно и прямолинейно. Равномерное и прямолинейное движение не вызывает, таким образом, никаких механических эффектов в этой системе, и поэтому эти эффекты не могут служить средством обнаружения такого движения.

Подобного рода принцип относительности, как казалось физикам, не мог быть справедлив в оптике и электродинамике. Ибо если первая система покоится относительно эфира, то движущаяся система, напротив, не находится в состоянии покоя, и отсюда следует, что движение этой второй системы относительно эфира можно наблюдать благодаря эффектам того рода, которые были исследованы Майкельсоном. Отрицательный результат опыта Морли и Миллера 1904 года позволял поэтому снова воскресить идею о том, что принцип относительности такого рода все-таки, вероятно, мог быть также справедлив в электродинамике, как и ранее в ньютоновской механике.

С другой стороны, имелся старый опыт Физо 1851 года, который, казалось, непосредственно противоречил этому принципу относительности. Физо исследовал скорость света в движущейся жидкости. Если бы принцип относительности был справедлив, то суммарная скорость света в движущейся жидкости должна была бы быть равной сумме скорости жидкости и скорости света в покоящейся жидкости. Однако это было не так. Опыт Физо показал, что суммарная скорость была несколько меньше, чем указанная сумма.

Несмотря на это отрицательный результат всех новейших попыток обнаружить движение относительно эфира побуждал физиков и математиков искать такое математическое толкование этих опытов, которое могло бы согласовать друг с другом волновое уравнение для рас-

пространения света и принцип относительности. Поэтому Лоренц предложил в 1904 году математическое преобразование, которое удовлетворяло этому требованию. Он должен был для этого ввести гипотезу, что движущиеся тела сокращаются в направлении своего движения (причем коэффициент сокращения зависит от скорости тела), а также что в различных системах отсчета измеряются различные кажущиеся промежутки времени, которые во многих опытах играют ту же роль, какую до сих пор играли реальные промежутки времени. На таком пути он смог прийти к результатам, соответствующим принципу относительности; кажущаяся скорость света была теперь в каждой системе отсчета одной и той же. Подобные идеи обсуждались Пуанкаре, Фицджеральдом и другими физиками.

Решающий шаг был сделан в 1905 году Эйнштейном, истолковавшим кажущееся время в преобразованиях Лоренца как время реальное и исключившим из рассмотрения время, которое Лоренц называл «истинным». Это означало изменение оснований физики — совершенно неожиданное и радикальное изменение, для которого именно и была необходима смелость молодого и революционного гения.

Чтобы сделать этот шаг в плане математического описания природы, надо было лишь применить к опыту преобразование Лоренца непротиворечивым образом. Однако благодаря новому истолкованию этого преобразования изменялись представления физиков о структуре пространства и времени, и многие проблемы физики предстали поэтому в новом свете. Эфирная субстанция, например, оказывалась ненужной и могла быть просто вычеркнута из учебников физики. Так как в таком случае все системы отсчета, находящиеся относительно друг друга в состоянии равномерного и прямолинейного движения, при описании природы эквивалентны друг другу, то более не имеет никакого смысла высказывание о том, будто есть такая эфирная субстанция, которая в одной определенной системе из этих систем отсчета находится якобы в состоянии покоя. На самом деле принимать во внимание такую субстанцию больше не имеет смысла, и много проще говорить, что световые волны распространяются в пустом пространстве и что электромагнитные поля обладают своей собственной реальностью и могут существовать в пустом пространстве.

Решающее изменение, однако, затрагивает структуру пространства и времени. Очень трудно описать это изменение словами обычного языка без применения математики, так как обычные слова «пространство» и «время» уже относятся к структуре пространства и времени, представляющей собой идеализацию и упрощение дей-

ствительной структуры. Несмотря на это необходимо попытаться описать новую структуру, и, пожалуй, это можно сделать следующим образом. Когда мы употребляем слово «прошлое», то тем самым имеем в виду все те события, о которых мы, по крайней мере в принципе, можем что-то знать и получить какие-то сведения. Подобным же образом слово «будущее» охватывает все те события, на которые мы, по крайней мере в принципе, еще можем воздействовать, которые мы можем как-то пытаться изменить или воспрепятствовать их свершению. Хотя сразу трудно утверждать, почему эти определения слов «прошлое» и «будущее» следует считать особенно целесообразными, но можно легко показать, что они в самом деле очень точно соответствуют обычному употреблению этих выражений. Если их употребляют подобным образом, то, как показывают результаты многих экспериментов, область событий, относимых к будущему или прошлому, не зависит от состояния движения или других свойств наблюдателя. На более строгом математическом языке можно сказать, что введенное определение инвариантно относительно перемещений наблюдателя. Оно справедливо как в ньютоновской механике, так и в теории относительности Эйнштейна.

Но здесь возникает существенное различие: в классической теории мы принимаем, что будущее и прошлое отделены друг от друга бесконечно малым интервалом времени, который можно назвать настоящим мгновением. В теории же относительности мы видели, что дело обстоит несколько иначе. Будущее отделено от прошлого конечным интервалом времени, длительность которого зависит от расстояния до наблюдателя. Какое угодно воздействие может распространяться только со скоростью, которая меньше или равна скорости распространения света. Поэтому наблюдатель в данное мгновение не может ни знать, ни оказать влияние на событие, происшедшее в некоторой удаленной точке в промежутке между двумя характеристическими моментами времени. Первый момент — мгновение, в которое должен быть послан из места события световой сигнал, который достигнет наблюдателя в момент наблюдения. Другой момент — мгновение, в которое световой сигнал, посланный наблюдателем в момент наблюдения, достигает места события. Весь конечный интервал времени между обоими этими мгновениями может быть назван для наблюдателя в данный момент наблюдения «настоящим». Ибо любое событие, происшедшее в этот интервал времени, не может в момент выполнения наблюдения ни стать известным наблюдателю, ни испытать какое-либо воздействие последнего, и именно так было определено понятие «настоящее». Всякое событие, имеющее место между

обоими характеристическими моментами времени, может быть названо «одновременным с актом наблюдения».

Использование выражения «может быть названо» уже указывает на двусмысленность слова «одновременно», объясняющуюся тем, что слово «одновременно» возникло из опыта повседневной жизни, в пределах которого скорость света можно считать практически бесконечно большой. На самом же деле слово «одновременно» может быть определено в физике несколько иначе, и Эйнштейн использовал в своих работах это второе определение «одновременности». Если два события в одной и той же точке пространства происходят одновременно, мы говорим, что они совпадают. Это выражение совершенно однозначно.

Теперь представим себе три точки в пространстве, лежащие на одной прямой линии таким образом, что средняя точка находится на одном и том же расстоянии от обеих крайних. Если два события в обеих внешних точках происходят в такие моменты времени, что световые сигналы, посланные в момент свершения событий, приходя в среднюю точку, совпадают, то оба события можно определить как «одновременные». Это определение является в данном случае более узким, чем первое. Одно из его важнейших следствий состоит в том, что, когда два события одновременны для одного наблюдателя, они, возможно, не одновременны для другого наблюдателя; это будет иметь место, если второй наблюдатель движется относительно первого. Соотношение между обоими определениями слова «одновременно» можно выразить высказыванием: во всех случаях, когда два события одновременны в первом смысле, можно найти также систему отсчета, в которой они одновременны и во втором смысле.

Несколько более наглядно положение вещей в целом можно, пожалуй, изобразить следующим образом: предположим, что спутник, вращающийся вокруг Земли, испускает сигнал, который через некоторый малый промежуток времени принимается станцией наблюдения на Земле. Эта станция наблюдения в ответ на данный сигнал посылает спутнику команду, которую он принимает через некоторый малый промежуток времени. Весь интервал времени между посылкой сигнала и приемом команды можно считать на спутнике, согласно первому определению, одновременным с моментом приема сигнала на Земле. Если на спутнике выбирается какое-либо определенное мгновение из этого интервала, то, хотя это мгновение, вообще говоря, в смысле второго определения, не «одновременно» с моментом приема сигнала на Земле, всегда существует система отсчета, в которой эта одновременность имеет место.

Первое определение слова «одновременно» кажется несколько более соответствующим обычному употреблению этого слова в повседневной жизни, так как вопрос о том, одновременны ли два процесса, в повседневной жизни определенно не зависит от системы отсчета. В обоих же релятивистских определениях понятие одновременности приобрело ту точность, которая совершенно отсутствовала у него в языке повседневной жизни. В квантовой теории физики должны были уже заранее осознать, что понятия классической механики описывают природу недостаточно точно, что квантовые законы ограничивают их применимость, и что поэтому при их использовании необходима большая осторожность. В теории относительности физики, напротив, пытались изменить смысл слов классической физики, уточнив эти понятия таким образом, чтобы они точно соответствовали новой, только что познанной ситуации в природе.

Структура пространства и времени, выявленная теорией относительности, находит много проявлений в самых различных разделах физики. Электродинамика движущихся тел может быть без труда выведена из принципа относительности. Сам этот принцип может быть сформулирован как весьма общий закон природы, относящийся не только к электродинамике или механике, но и к любой группе законов природы: законы должны принимать одну и ту же форму во всех системах отсчета, отличающихся друг от друга лишь состоянием равномерного и прямолинейного движения. Они инвариантны, как можно сказать на языке математики, относительно преобразований Лоренца.

По-видимому, наиболее важным следствием принципа относительности является установление свойства инерции энергии, или эквивалентности массы и энергии. Так как скорость света играет роль предельной скорости, которая никогда не может быть достигнута никаким материальным телом, то можно легко понять, что движущееся тело должно приобретать ускорение с большим трудом, чем еще покоящееся тело. Инерция, стало быть, увеличивается с возрастанием кинетической энергии. Говоря обобщенно, каждый вид энергии несет в себе определенную инерцию, то есть массу, и масса, соответствующая данной энергии, равна этой энергии, деленной на квадрат скорости света. Всякая энергия несет, стало быть, с собой массу, но даже очень большие — по обычным понятиям — количества энергии дают все-таки лишь очень небольшое увеличение массы, и это является причиной того, что связь массы и энергии ранее не была обнаружена. Два закона — закон сохранения массы и сохранения энергии — потеряли свою независимую друг от друга справедливость и оказались

объединенными в единый закон, который можно назвать законом сохранения энергии или массы.

50 лет назад, когда была создана теория относительности, эта гипотеза об эквивалентности массы и энергии революционизировала физику, но экспериментальных доказательств этого закона было тогда очень мало. В наши дни можно во многих экспериментах непосредственно видеть, как элементарные частицы рождаются из кинетической энергии и как такие частицы могут снова исчезнуть, превратившись в излучение. Поэтому ныне превращение энергии в массу и наоборот не представляет собой ничего необыкновенного.

Огромные количества энергии, которые освобождаются при атомных взрывах, представляют собой другое и гораздо более очевидное доказательство справедливости соотношения Эйнштейна. Но, вероятно, здесь следует сделать критическое замечание исторического порядка. Иногда утверждают, что огромные количества энергии возникают при атомных взрывах непосредственно вследствие превращения массы в энергию, и что эти гигантские количества энергии могли быть предсказаны только на основе теории относительности. Это мнение основано, однако, на недоразумении. Большие количества энергии, запасенные в недрах атомных ядер, были известны со времени экспериментов Беккереля, Кюри и Резерфорда по радиоактивному распаду.

Любое радиоактивное вещество, например радий, выделяет количество тепла, которое может быть высвобождено из такого же количества вещества в химической реакции. Энергия распада ядра урана имеет то же происхождение, что и энергия α -распада ядра радия, а именно в основном электростатическое отталкивание двух обломков, на которые атомное ядро распалось. Энергия, высвобождающаяся при атомном взрыве, выделяется, стало быть, непосредственно из этого источника, а не возникает благодаря превращению массы в энергию. Ибо число элементарных частиц с конечной массой покоя во время атомного взрыва совершенно не уменьшается. Правда, энергия связи «строительных кирпичей» атомного ядра проявляет себя также в массах покоя ядер, и поэтому высвобождение энергии косвенно связано и с изменением масс атомных ядер.

Эквивалентность массы и энергии, кроме своего огромного значения для практической физики, подняла также вопросы, связанные с очень старой философской проблематикой. Различные философские системы прошлого исходили из тезиса, что субстанция, или материя, неуничтожима. Эксперименты, которые проводятся в современной физике, показали, что элементарные частицы, например, позитроны и электроны, могут быть уничтожены и превращены в излучение. Означает ли это, что более старые философские системы тем самым

опровергнуты новейшим опытом и что аргументы, выдвигающиеся в этих более ранних системах, должны считаться ложными?

Это было бы, несомненно, несколько преждевременное и неоправданное заключение, ибо понятия «субстанция» и «материя» в античной или средневековой философии нельзя просто отождествлять с понятием «масса» в современной физике. Если наши современные знания выразить на языке более старых философских систем, то можно было бы, например, массу и энергию рассматривать в качестве двух различных форм одной и той же субстанции и, таким образом, сохранить представление о неуничтожимости субстанции.

С другой стороны, едва ли можно сказать, что так уж много достигают, выражая новейшие знания на старом языке. Философские системы прошлого сформировались из всей совокупности знаний того времени, и поэтому соответствуют тому образу мышления, какой приводил к этим знаниям. Имеется полное основание считать, что философы, размышлявшие о природе много столетий назад, не могли предвидеть развитие квантовой теории или теории относительности. Поэтому понятия, к которым философы давно прошедшего времени пришли на основе анализа своих знаний о природе, не могут ныне соответствовать явлениям, могущим быть наблюдаемыми только с помощью сложнейших технических средств нашего времени.

Но прежде чем будут обсуждены философские выводы из теории относительности, следует еще кратко обрисовать ее дальнейшее развитие.

Гипотетическая субстанция «эфир», игравшая столь важную роль в более ранних истолкованиях теории Максвелла в XIX столетии, как это уже упоминалось выше, была устранена теорией относительности. Это обстоятельство часто выражают также в виде утверждения, что теорией относительности было устранено абсолютное пространство. Но такое утверждение нуждается в некоторых оговорках. Правда, согласно специальной теории относительности, больше нельзя выбрать определенную систему отсчета, относительно которой эфир покоился бы и которая по этой причине заслуживала бы название «абсолютной». Но было бы все же неправильно утверждать, что теперь пространство будто бы потеряло все физические качества. Уравнения движения материальных тел или полей все еще принимают различный вид в «обычной» системе отсчета и в другой системе, равномерно вращающейся относительно «обычной» системы отсчета. Если ограничиваются теорией относительности 1905–1906 годов, то существование центробежных сил во вращающейся системе отсчета доказывает, что существуют физические свойства пространства, позволяющие отличить вращающиеся системы от не вращающихся.

В философском плане это не кажется удовлетворительным, и было бы предпочтительнее приписывать физические свойства только физическим объектам, как, например, материальным телам или полям, а не пустому пространству. Однако если ограничиться рассмотрением электромагнитных процессов и механических движений, то наличие этих свойств у пустого пространства следует просто из фактов, которые не могут быть оспорены, например, из факта существования центробежной силы.

Тщательный анализ этой ситуации привел Эйнштейна примерно десятилетие спустя к весьма важному обобщению теории относительности, обычно называемому «общей теорией относительности». Но, прежде чем перейти к изложению основных идей новой теории, необходимо сказать несколько слов о степени достоверности, которая гарантирует справедливость этих двух разделов теории относительности. Теория, созданная в 1905–1906 годах, то есть так называемая специальная теория относительности, основана на множестве очень точно проверенных экспериментальных фактов — на опытах Майкельсона и Морли и многих других подобных экспериментах, на эквивалентности массы и энергии в очень большом числе радиоактивных процессов, на очень точно наблюдаемой зависимости времени жизни радиоактивных объектов от скорости радиоактивных частиц и т. д. Эта теория является, таким образом, твердым, надежным основанием современной физики и при нашем сегодняшнем знании не может быть оспорена.

В отношении общей теории относительности экспериментальные доказательства, напротив, гораздо менее убедительны, так как в общем экспериментальный материал очень ограничен. Имеется только несколько астрономических наблюдений, с помощью которых можно проверить справедливость предположений теории относительности. Поэтому вторая теория более гипотетична, чем первая.

Решающая фундаментальная гипотеза общей теории относительности — предположение о тождестве тяготеющей и инертной масс. Весьма тщательные измерения показали, что масса тела, определяемая его весом, в точности пропорциональна другой массе, определяемой инерцией тела. Даже самые точные измерения никогда не давали никаких отклонений от этого закона. Если этот закон имеет универсальное значение, то силы тяготения могут быть поставлены в параллель с центробежными или другими силами, возникающими как реакция на инерционные воздействия. Так как центробежные силы должны быть поставлены в связь с физическими свойствами пустого пространства, как это показано выше, то Эйнштейн пришел к гипотезе о том, что силы тяготения также соответствуют свойствам пустого

пространства. Это был очень важный шаг, который тотчас же сделал необходимым новый шаг в том же направлении. Мы знаем, что силы тяготения вызываются массами. Поэтому если тяготение связано со свойствами пространства, то эти свойства пространства должны быть порождены массой или испытывать воздействия масс. Центробежные силы во вращающейся системе отсчета, возможно, должны вызываться вращением относительно этой системы весьма удаленных масс Вселенной.

Чтобы провести в жизнь программу, намеченную в этих утверждениях, Эйнштейн должен был связать эти основополагающие физические соображения с математической схемой общей геометрии, развитой Риманом. Так как свойства пространства, очевидно, непрерывно меняются с изменением гравитационных полей, то геометрия мира должна быть подобной геометрии искривленных поверхностей, на которых прямые линии евклидовой геометрии должны быть заменены геодезическими линиями, то есть линиями наименьшей длины, и кривизна непрерывно меняется от точки к точке. В качестве окончательного результата Эйнштейн смог предположить в конце концов математическую формулировку соотношения между распределением масс и параметрами, определяющими геометрию. Эта теория правильно отображает общеизвестные факты, характеризующие тяготение. Она в очень хорошем приближении идентична с обычной теорией тяготения и, кроме того, предсказывает некоторые очень интересные эффекты, лежащие как раз на границе возможностей измерительных приборов. К ним относится, например, влияние силы тяготения на излучение.

Если массивная звезда испускает монохроматическое излучение, то световые кванты, удаляясь от звезды в поле ее тяготения, теряют часть своей энергии. Отсюда следует, что испускаемые спектральные линии должны испытывать смещение к красному концу спектра. До сих пор нет еще, как очень ясно показало обсуждение Фрейндлихом проведенных доньше опытов, ни одного не вызывающего возражений экспериментального доказательства наличия этого красного смещения. Но было бы также преждевременно заключить, что опыты якобы опровергли предсказания теории Эйнштейна.

Луч света, проходящий вблизи Солнца, должен отклоняться полем тяготения Солнца. Это отклонение имеет, как экспериментально показано Фрейндлихом и другими астрономами, предсказываемый порядок величины. Но совпадает ли отклонение точно с предсказываемой теорией Эйнштейна величиной — этот вопрос остался еще нерешенным.

Лучшим экспериментальным доказательством справедливости общей теории относительности является, кажется, движение перигелия

орбиты планеты Меркурий, величина которого, по-видимому, находится в очень хорошем согласии с предсказаниями теории.

Хотя, таким образом, экспериментальный базис общей теории относительности еще довольно узок, она, однако, содержит идеи огромнейшей степени важности. В течение всего времени развития математики от античности до XIX столетия евклидова геометрия рассматривалась как самоочевидная. Аксиомы Евклида имели отношение к основаниям любой математической теории геометрического характера и представляли собой базис, который не мог быть поставлен под сомнение. Затем в XIX столетии математики Больяй и Лобачевский, Гаусс и Риман нашли, что можно построить другие геометрии, которые могут быть развиты с той же математической строгостью, что и евклидова. Поэтому вопрос о том, какая геометрия является справедливой, с этого времени становится эмпирическим. И только в трудах Эйнштейна этот вопрос смог быть поставлен как физический. Геометрия, о которой идет речь в общей теории относительности, включает в себя не только геометрию трехмерного пространства, но и четырехмерное многообразие пространства и времени. Теория относительности устанавливает связь между геометрией этого многообразия и распределением масс во Вселенной. Значит, эта теория поднимает в новой форме старые вопросы пространства и времени в случае очень больших расстояний, и она предполагает ответы, которые могут быть проверены наблюдениями.

Следовательно, можно снова поставить очень старые философские вопросы, занимавшие человеческий разум со времени самых ранних эпох философии и науки: конечно или бесконечно пространство? Что было до начала времени? Что будет в конце времени? Или у времени нет ни начала, ни конца? Эти вопросы нашли различные ответы в различных религиях и философских системах. В философии Аристотеля, например, все пространство Вселенной представлялось как конечное, хотя оно и было бесконечно делимо. Пространство возникает благодаря протяженности тел, оно в известном смысле растягивается телами. Поэтому там, где нет никаких тел, нет и пространства. Вселенная состоит из Земли, Солнца и звезд — конечного числа тел. По ту сторону сферы неподвижных звезд нет никакого пространства. Поэтому пространство Вселенной и было конечным.

В философии Канта этот вопрос принадлежал к тому, что он назвал «антиномиями», — к числу вопросов, на которые нельзя ответить, так как два различных доказательства ведут к взаимно противоположным выводам. Пространство не может быть конечным, потому что мы не можем себе представить «конец» пространства. И какой бы точки пространства мы ни достигли, мы всегда представляем себе, что

можем двигаться еще дальше. Но пространство не может быть и бесконечным, потому что пространство — это нечто, что мы можем себе представить, иначе понятия пространства не возникло бы вовсе, а мы не можем представить себе бесконечное пространство. В отношении этого второго утверждения доказательство Канта нельзя передать дословно. Утверждение «пространство бесконечно» означает для нас нечто негативное: мы не можем дойти до «конца» пространства. Для Канта, однако, бесконечность пространства означает нечто действительно данное, нечто, что «существует» в смысле, который мы едва ли можем выразить. Кант приходит к выводу, что на вопрос о том, конечно или бесконечно пространство, нельзя дать никакого рационального ответа, потому что Вселенная в целом не может быть предметом нашего опыта.

Подобное же положение возникает и относительно проблемы бесконечности времени. В исповеди Августина, например, вопрос поставлен в следующей форме: «Что делал Бог до того, как он создал мир?» Августин не был удовлетворен известным ответом: «Бог был занят тем, что создавал ад для людей, задающих глупые вопросы». Это был бы слишком дешевый ответ, полагает Августин; и он пытается рационально проанализировать проблему: только для нас время течет, только мы ожидаем его как будущее, оно протекает для нас как настоящее мгновение, и мы вспоминаем о нем как о прошлом. Но Бог не находится во времени. Тысяча лет для него — что один день, и один день — что тысяча лет. Время было создано вместе с миром, оно, стало быть, принадлежит миру, и поэтому в то время, когда не существовало Вселенной, не было и никакого времени. Для Бога весь ход событий во Вселенной был дан сразу. Значит, не было никакого времени до того, как мир был создан Богом.

Правда, легко понять, что в подобных формулировках понятие «создан» тотчас же приводит к существенным трудностям. Это слово, в том виде как оно обычно употребляется, означает нечто, что возникает и чего ранее не существовало, и в этом смысле оно уже предполагает понятие времени. Поэтому в рациональных выражениях невозможно дать определение того, что можно понимать под оборотом речи «время было создано». Это обстоятельство снова напоминает нам часто обсуждаемый урок, который необходимо извлечь из новейшего развития физики, а именно: что всякое слово или всякое понятие, каким бы ясным оно нам ни казалось, имеет все-таки только ограниченную область применения.

Эти вопросы о бесконечности пространства и времени могут быть в общей теории относительности поставлены и отчасти — на основании эмпирического материала — решены. Если теория правильно

описывает связь четырехмерной геометрии пространства и времени с распределением масс во Вселенной, то астрономические наблюдения о распределении спиральных туманностей в пространстве могут дать нам информацию о геометрии Вселенной. Тогда можно будет построить по крайней мере модели Вселенной, космологические картины, следствия которых могут быть сравнены с эмпирическими фактами.

Наши современные астрономические познания не позволяют окончательно решить, какую из нескольких возможных моделей следует выбрать. Может оказаться, что пространство Вселенной конечно. Но это не означало бы, что в каком-нибудь месте есть «конец» Вселенной. Это вело бы только к тому, что если бы мы все далее и далее продвигались во Вселенной в одном определенном направлении, то в конце концов должны были бы возвратиться к точке, из которой начали движение. Положение, стало быть, напоминало бы двумерную геометрию на поверхности Земли, где мы также, если будем двигаться из определенной точки все далее и далее, скажем, в восточном направлении, в конце концов возвратимся к этой точке с запада.

Что касается времени, то здесь, кажется, что-то вроде «начала» имело место. Многие наблюдения указывают на то, что Вселенная около 4 миллиардов лет назад имела «начало» или, во всяком случае, что в то время материя Вселенной была сконцентрирована в значительно меньшем объеме пространства, чем сейчас, и что с того времени Вселенная все еще продолжает расширяться из этого небольшого объема с различными скоростями. Это одно и то же время в 4 миллиарда лет все снова и снова появляется во многих различных наблюдениях, например возраста метеоритов, минералов на Земле и т. д., и поэтому было бы, вероятно, затруднительно найти этому объяснение, совершенно отличное от идеи возникновения мира 4 миллиарда лет назад. Если идея «возникновения» в этой форме окажется правильной, то это будет означать, что по ту сторону указанного момента времени — то есть ранее, чем 4 миллиарда лет назад, — понятие времени должно претерпеть существенные изменения. Это более осторожное заключение становится на место простой формулировки о создании мира. При современном состоянии астрономических наблюдений эти вопросы геометрии пространства—времени еще не могут быть решены с какой-нибудь степенью надежности. Но уже довольно интересно знать, что эти вопросы, возможно, позднее смогут быть решены в один прекрасный момент на прочной основе астрономических знаний.

Даже если дальнейшее рассмотрение ограничить более надежно обоснованной специальной теорией относительности, то можно не сомневаться, что эта теория в огромной степени изменила наши

представления о структуре пространства и времени. Беспокоит в этих изменениях, пожалуй, не столько их особенная природа, сколько тот факт, что они вообще оказались возможны. Структура пространства и времени, которую Ньютон математически установил в качестве основы своего описания природы, не содержала никаких внутренних противоречий, была проста и очень точно соответствовала употреблению понятий пространства и времени, к которому мы привыкли в повседневной жизни. Соответствие фактически было столь близким, что ньютоновские определения можно было рассматривать просто как точную математическую формулировку этих понятий пространства и времени повседневной жизни. До теории относительности считалось само собой разумеющимся, что процессы могут быть упорядочены во времени независимо от их расположения в пространстве. Мы знаем, что в повседневной жизни это впечатление возникает потому, что скорость света значительно больше каких угодно других скоростей, с которыми имеют дело в повседневной жизни. В то время это ограничение, естественно, никто не представлял себе отчетливо. Но даже при условии, что сейчас мы знаем об этом ограничении, едва ли можно себе представить, что порядок событий во времени должен зависеть от их пространственного расположения, то есть от места, в котором они происходят. Философия Канта позднее привлекла внимание к тому факту, что понятия пространства и времени включаются в наши отношения с природой, а не только принадлежат природе самой. Мы не можем описывать природу, не пользуясь этими понятиями. Поэтому в известном смысле эти понятия априорны, они представляют собой прежде всего условие опыта, а не результат опыта, и потому вообще предполагается, что они не могут быть изменены новым опытом. Ввиду этого необходимость изменения оказалась большой неожиданностью. Ученые в первый раз ощутили, какая необходима осторожность при попытках применить понятия повседневной жизни к усовершенствованному на базе новейшей экспериментальной техники опыту. Даже точная и непротиворечивая формулировка этих понятий на математическом языке ньютоновской механики или их тщательный анализ в философии Канта не дали никакой гарантии от необходимости их критического анализа, который стал возможен позднее благодаря исключительно точным измерениям. Это предупреждение позднее оказалось для развития новейшей физики чрезвычайно полезным, и понять квантовую теорию было бы наверняка значительно труднее, если бы успех теории относительности не предостерег физиков от некритического применения понятий, которые заимствованы из повседневной жизни или классической физики.

1959 г.

Весной 1926 года я был приглашен сообщить в рамках физического коллоквиума о недавно возникшей квантовой механике. Берлинский университет считался тогда оплотом физической науки в Германии. Здесь работали Планк, Эйнштейн, фон Лауэ и Нернст. Здесь Планк открыл квантовую теорию, а Рубенс подтвердил ее своими измерениями теплового излучения, и здесь же Эйнштейн в 1916 году сформулировал общую теорию относительности и теорию гравитации. Центром научной жизни являлся физический коллоквиум, который восходил еще к традиции времен Гельмгольца и на который большей частью в полном составе приходили профессора физики. Поскольку тут мне впервые представлялась возможность лично познакомиться с носителями прославленных имен, я не пожалел усилий, чтобы как можно яснее изложить понятия и математические основания новой теории, столь непривычные для тогдашней физики, и мне удалось пробудить интерес некоторых присутствовавших, особенно Эйнштейна. Эйнштейн попросил меня после коллоквиума зайти к нему домой, с тем чтобы мы смогли подробно обсудить новые идеи.

По пути он осведомился о ходе моей учебы и о моих прежних интересах в физике. Однако стоило нам войти в его квартиру, он тут же начал разговор с вопроса, касающегося философских предпосылок моей работы: «То, что Вы нам рассказали, звучит очень непривычно. Вы предполагаете, что в атоме имеются электроны, и здесь Вы, наверное, совершенно правы. Но что касается орбит электронов в атоме, то Вы хотите их совсем упразднить, несмотря на то, что траектории электронов в камере Вильсона можно наблюдать непосредственно. Не могли бы Вы несколько подробнее разъяснить причины столь странного подхода?»

— Орбиты электронов в атоме наблюдать нельзя, — так примерно отвечал я, — но по излучению, исходящему от атома при разрядке, можно непосредственно заключить о частотах колебаний и о соответствующих амплитудах электронов в атоме. Знание всех колебаний и амплитуд в математическом выражении — это ведь и по понятиям прежней физики может служить чем-то вроде эрзаца знания электронных орбит. Поскольку же разумно включать в теорию только величины, поддающиеся наблюдению, мне казалось естественным допустить лишь эти данные, так сказать, в качестве представителей орбит электронов.

— Но неужели Вы всерьез думаете, — возразил Эйнштейн, — что в физическую теорию можно включать лишь наблюдаемые величины?

— А разве не Вы сами, — спросил я в изумлении, — положили именно эту идею в основу своей теории относительности? Вы ведь подчеркивали, что нельзя говорить об абсолютном времени потому, что это абсолютное время невозможно наблюдать: для определения времени значимы лишь показания часов, будь то в подвижной или в покоящейся системе отсчета.

— Возможно, я и пользовался философией этого рода, — отвечал Эйнштейн, — но она тем не менее чужь. Или, сказал бы я осторожнее, помните о том, что мы действительно наблюдаем, а что нет, имеет, возможно, некоторую эвристическую ценность. Но с принципиальной точки зрения, желание строить теорию только на наблюдаемых величинах совершенно нелепо. Потому что в действительности все ведь обстоит как раз наоборот. Только теория решает, что именно можно наблюдать. Видите ли, наблюдение, вообще говоря, есть очень сложная система. Подлежащий наблюдению процесс вызывает определенные изменения в нашей измерительной аппаратуре. Как следствие, в этой аппаратуре разворачиваются дальнейшие процессы, которые, в конце концов, косвенным путем воздействуют на чувственное восприятие и на фиксацию результата в нашем сознании. На всем этом долгом пути от процесса к его фиксации в нашем сознании мы обязаны знать, как функционирует природа, должны быть хотя бы практически знакомы с ее законами, без чего вообще нельзя говорить, что мы что-то наблюдаем. Таким образом, только теория, то есть знание законов природы, позволяет нам логически заключать по чувственному восприятию о лежащем в его основе процессе. Поэтому вместо утверждения, что мы можем наблюдать нечто новое, следовало бы по существу выразаться точнее: хотя мы намереемся сформулировать новые законы природы, не согласующиеся с ранее известными, мы все же предполагаем, что прежние законы природы на всем пути от наблюдаемого явления до нашего сознания функционируют достаточно безотказным образом, чтобы мы могли на них полагаться, а следовательно, говорить о «наблюдениях». Например, в теории относительности предполагается, что даже в движущейся системе отсчета световые лучи, идущие от часов к глазу наблюдателя, функционируют в общем и целом точно так же, как от них можно было ожидать и прежде. И Вы в своей теории совершенно очевидно исходите из того, что весь механизм светового излучения, от колеблющегося атома до спектрального прибора или до глаза, функционирует в точности так, как всегда от него ожидалось, то есть, по существу, по законам Максвелла. Не будь это так, Вы вовсе не могли бы наблюдать величины, которые называете наблюдаемыми. Ваше утверждение, что

Вы вводите только наблюдаемые величины, есть по сути дела некое предположение о свойстве теории, которую Вы пытаетесь сформулировать. Вы предполагаете, что Ваша теория не затрагивает прежнего описания процессов излучения в интересующих Вас пунктах. Вы тут, возможно, правы, но это никоим образом не достоверно.

Я был крайне поражен такой позицией Эйнштейна, хотя его аргументы были мне вполне понятны, и поэтому я переспросил: «Идея, что теория есть, собственно, лишь подытоживание наблюдений по принципу экономии мышления принадлежит, вообще говоря, физику и философу Маху; причем не раз утверждалось, что Вы в теории относительности опирались решающим образом именно на эту идею Маха. Но сказанное Вами сейчас идет, по-видимому, в прямо противоположном направлении. Что же я теперь должен думать или, точнее, что Вы сами думаете по этому вопросу?»

— Это очень долгая история, но если Вы желаете, мы можем поговорить об этом подробнее. Понятие экономии мышления у Маха содержит, надо думать, какую-то долю истины, но для меня оно как-то слишком банально. Приведу для начала пару аргументов в защиту Маха. Наше общение с миром совершается явным образом через наши чувства. Уже когда мы маленькими детьми учимся говорить и думать, мы делаем это за счет возможности обозначить одним словом — скажем, словом «мяч» — очень сложный, но внутренне как-то взаимосвязанный ряд чувственных впечатлений. Мы узнаем слово от взрослых и испытываем удовлетворение, оттого что способны объясниться с ними. Мы вправе сказать поэтому, что образование слова и тем самым понятия «мяч» есть акт экономии мысли, поскольку оно дало нам простой способ объединить свои довольно-таки сложные чувственные впечатления. Мах совсем не касается здесь вопроса о том, какими психическими и телесными предпосылками должен обладать человек — в данном случае маленький ребенок, — чтобы начался процесс взаимопонимания. У животных он, как известно, функционирует намного хуже. Но это уже другая тема.

Мах полагает, далее, что формирование естественнонаучных теорий — порой очень сложных — происходит принципиально аналогичным образом. Мы пытаемся единообразно упорядочить феномены, свести их к чему-то простому до тех пор, пока не удастся с помощью небольшого числа понятий осмыслить какую-нибудь достаточно большую группу явлений, и «понимание» означает здесь, собственно, не более чем способность охватить это многообразие явлений с помощью немногих простых понятий. Так вот, все это звучит весьма правдоподобно, но следует все-таки спросить, как понять сам принцип экономии мысли. Идет ли здесь речь о психологической или о

логической экономии, иначе говоря, идет ли речь о субъективной или объективной стороне явления. Когда ребенок формирует понятие «мяч», достигается ли тут лишь психологическое упрощение, то есть сложные чувственные впечатления подытоживаются в одном понятии, или мяч действительно существует? Мах, вероятно, ответил бы: «Утверждение, что мяч действительно существует, не содержит ничего, кроме констатации наличия легко обобщаемого комплекса чувственных впечатлений». Но тут Мах неправ. Ибо, во-первых, утверждение «мяч действительно существует» содержит массу высказываний о потенциальных чувственных впечатлениях, которые вероятным образом поступят к нам в будущем. Потенциальное, ожидаемое есть важная составная часть нашей действительности, о которой нельзя просто забыть, замечая один факт. И, во-вторых, надо учесть, что умозаключение от чувственных впечатлений к представлениям о вещах относится к основным предпосылкам нашего мышления, и если бы мы захотели говорить только о чувственных впечатлениях, то сами лишили бы себя языка и мышления. Иначе говоря, тот факт, что мир действительно существует, что в основе наших чувственных восприятий лежит нечто объективное, Мах обходит стороной. Я не собираюсь защищать наивный реализм, я-то уж знаю, какие трудные вопросы тут возникают, однако и понятие наблюдения у Маха мне кажется как-то уж слишком наивным. Мах поступает так, как если бы было уже известно, что означает слово «наблюдать», и поскольку он надеется, что можно ускользнуть от решения о субъективности или объективности наблюдаемого, то в его понятие простоты и входит столь подозрительно коммерческая черта: экономия мысли. У этого понятия чересчур уж субъективная окраска. В действительности простота законов природы — тоже объективный факт, и тут следовало бы для корректности образования понятия привести субъективную и объективную стороны простоты в должное равновесие. Но это, видеть, слишком сложно. Однако вернемся лучше к предмету Вашего доклада. Боюсь, что именно в том пункте, о котором мы сейчас говорили, Вы в своей теории еще встретитесь позднее с трудностями. Объяснюсь точнее. Вы ведете себя так, будто в сфере наблюдения можете все оставить в прежнем виде, то есть будто Вы имеете право говорить на старом языке о том, что наблюдают физики. Но тогда Вам придется также сказать: в камере Вильсона мы наблюдаем траекторию проходящего через камеру электрона. А в атоме, на Ваш взгляд, никаких электронных орбит уже не оказывается! Это же, согласитесь, очевидная чушь. Нельзя ведь из-за простого уменьшения пространства, в котором движется электрон, отменять само понятие его траектории.

Мне пришлось в меру сил защищать новую квантовую механику: «Пока мы вообще еще не знаем, на каком языке можно говорить о том, что происходит внутри атома. У нас, правда, есть математический язык, то есть математическая схема, с помощью которой мы можем вычислить стационарные состояния атома или вероятности перехода от одного состояния к другому. Но мы еще не знаем — по крайней мере полностью не знаем — как этот язык связан с обычным языком. Разумеется, установить эту связь нам необходимо, чтобы иметь хотя бы возможность приложить теорию к экспериментам. Ведь об экспериментах мы всегда говорим на привычном языке, то есть на языке классической физики. Я поэтому не могу утверждать, что мы уже поняли квантовую механику. Надеюсь, что математическая схема уже в полном порядке, однако ее связь с обычным языком еще не установлена. Лишь когда это удастся, появится надежда описать и траекторию электрона в камере Вильсона, не впадая во внутренние противоречия. Для разрешения описанных Вами трудностей просто пока еще время не подошло».

— Хорошо, пусть будет так, — сказал Эйнштейн, — как-нибудь через несколько лет снова поговорим об этом. Но, кажется, в связи с Вашим докладом я вынужден поставить еще один вопрос. В квантовой теории есть два очень разных аспекта. Она старается учитывать то, что справедливо подчеркивал прежде всего Бор, а именно устойчивость атомов, и предусматривает постоянное воспроизведение одних и тех же форм. С другой стороны, она описывает странную черту прерывности, дискретности в природе, что можно очень наглядно наблюдать, например, когда мы в темноте видим на люминесцентном экране световые вспышки, вызванные радиоактивным препаратом. Разумеется, оба эти аспекта взаимосвязаны. В Вашей квантовой механике Вам приходится учитывать и тот, и другой аспекты. Вы умеете рассчитывать дискретные энергетические уровни стационарных состояний. Таким образом, Ваша теория способна, по-видимому, учитывать стабильность определенных форм, которые не могут беспрестанно переливаться друг в друга, но различаются между собой на конечные величины и явно способны формироваться каждый раз заново. Но что происходит при испускании света? Вам известно, что я попытался выработать представление, согласно которому переход атома с одного стационарного энергетического уровня на другой совершается в некотором смысле внезапно, причем разность энергий испускается в виде пакета энергии, так называемого светового кванта. Если это так, то вот Вам особенно яркий пример Вашей прерывности. Считаете ли Вы верным такое представление? Могли бы Вы как-то точнее описать этот переход из одного стационарного состояния в другое?

В своем ответе мне пришлось сослаться на Бора: «Думаю, Бор хорошо показал, что о таком переходе вообще нельзя говорить в старых понятиях, во всяком случае, его нельзя описывать как процесс в пространстве и времени. Этим, конечно, еще очень мало что сказано. Собственно, только то и сказано, что мы тут ничего не знаем. Следует ли мне верить в световые кванты или нет, я решить не могу. Излучение явно заключает в себе момент дискретности, который Вы изображаете с помощью Ваших световых квантов. Но, с другой стороны, есть и явный элемент непрерывности, который дает о себе знать в явлениях интерференции и который проще всего описать с помощью волновой теории света. Конечно, Вы имеете полное право спросить, можно ли от квантовой механики, которая и сама-то пока еще по-настоящему не понятна, узнать что-либо новое в отношении этих устрашающе трудных вопросов. Я лично думаю, что на это по крайней мере можно надеяться. Не исключено, что мы получим интересную информацию при изучении атома, состоящего в энергообмене с другими атомами своего окружения или с полем излучения. Тогда можно будет поставить вопрос о колебаниях энергии в атоме. Если энергия меняется скачками, как то предполагается Вашей идеей световых квантов, то колебание, или, выражаясь математически более точно, средний квадрат колебаний будет больше, чем при плавном изменении энергии. Я склонен думать, что исходя из квантовой механики мы получим как раз это большее значение и, следовательно, непосредственно увидим элемент дискретности. С другой стороны, следует ожидать, что мы обнаружим и момент непрерывности, дающий о себе знать в опытах с интерференцией. Возможно, переход из одного стационарного состояния в другое следует представлять себе аналогично тому, как в некоторых фильмах один кадр переходит в следующий. Этот переход происходит не вдруг, а так, что один кадр мало-помалу блекнет, другой медленно всплывает и становится ярче, так что некоторое время кадры накладываются друг на друга, и неизвестно, что мы, собственно, видим.

Возможно, точно так же существует некое промежуточное состояние, когда неизвестно, находится ли атом на более высоком или более низком энергетическом уровне».

— Теперь, однако, Ваши мысли приняли очень опасное направление, — предостерег Эйнштейн. — Вы вдруг заговорили о том, что мы знаем о природе, а не о том, как природа ведет себя на самом деле. А ведь в естествознании речь может идти только о выяснении того, что реально делает природа. Очень может быть, что Вы и я знаем о природе что-то свое. Но кого это может интересовать? Поэтому, если Ваша теория верна, Вы должны рано или поздно суметь рассказать мне, как

ведет себя атом, когда он, излучая, переходит из одного стационарного состояния в другое.

— Может быть, — ответил я нерешительно. — Однако мне кажется, что Вы слишком жестко пользуетесь языком. Впрочем, признаю, что все мои сегодняшние ответы имели пока характер пустой отговорки. Давайте тогда подождем и посмотрим, как атомная теория будет развиваться дальше.

Тут Эйнштейн оглядел меня несколько критическим взглядом: «Почему Вы, собственно, так упрямо верите в Вашу теорию, когда многие основополагающие вопросы еще совершенно неясны?»

Кажется, я долго собирался с мыслями, прежде чем ответить на этот вопрос Эйнштейна. Однако затем сказал примерно следующее: «Я считаю, как и Вы, что простота природных законов носит объективный характер, что дело не только в экономии мышления. Когда сама природа подсказывает математические формы большой красоты и простоты, — под формами я подразумеваю здесь замкнутые системы основополагающих постулатов, аксиом и тому подобное, — формы, о существовании которых никто еще не подозревал, то поневоле начинаешь верить, что они «истинны», то есть что они выражают реальные черты природы. Возможно, что в этих формах отразилось и наше отношение к природе, что в них есть и элемент экономии мысли. Но, поскольку человек не своими силами вырабатывает эти формы, а их нам открывает сама природа, они тоже относятся к самой действительности, а не только к нашим мыслям о действительности. Вы можете упрекнуть меня в том, что, говоря о простоте и красоте, я использую эстетический критерий истины. Однако должен признаться, что простота и красота математической схемы, подсказанной нам здесь природой, обладают для меня большой убеждающей силой. Ведь Вы тоже должны были пережить состояние, когда почти пугаешься от простоты и завершенной цельности закономерностей, которые природа вдруг развертывает перед нами и которые для нас полная неожиданность. Чувство, охватывающее при таком озарении, принципиально отличается от удовлетворения, которое бывает, например, от сознания отлично выполненной профессиональной работы, будь то в физике или в другой сфере. Вот почему я и надеюсь, что упоминавшиеся выше трудности как-то удастся преодолеть. Простота математической схемы имеет здесь следствием еще и то, что она дает возможность спроектировать много экспериментов, результат которых можно по теории предсказать с большой точностью. Если такие эксперименты будут проведены и дадут предсказанный результат, то уж едва ли надо будет сомневаться в том, что теория в этой области правильно описывает природу».

— Конечно, — заметил Эйнштейн, — экспериментальное подтверждение является тривиальной предпосылкой правильности теории. Но ведь никогда нельзя проверить все. Тем интереснее для меня то, что Вы сказали относительно простоты. Впрочем, я никогда не стал бы утверждать, будто я действительно понял, что такое на самом деле эта простота природных законов.

Разговор о критериях истины в физике продолжался еще некоторое время, а потом я простился с Эйнштейном и встретился с ним лишь спустя полтора года на Сольвеевском конгрессе в Брюсселе, где теоретико-познавательные и философские основы нашей теории еще раз стали предметом чрезвычайно острых дискуссий.

1969 г.

М. Борн

Статистические теории Эйнштейна

Одной из самых замечательных книг во всей научной литературе мне кажется том 17-й *Annalen der Physik* (4-я серия) 1905 года. Он содержит три статьи Эйнштейна, каждая из которых имеет дело с различным предметом и каждая является сегодня признанным шедевром, началом новой области физики. Этими тремя предметами являются, следуя страницам тома, теория фотонов, броуновское движение и теория относительности.

Теории относительности посвящена последняя из трех статей, и это показывает, что в то время ум Эйнштейна не был полностью занят его идеями о пространстве и времени, одновременности и электродинамике. По-моему, он был бы одним из самых выдающихся физиков-теоретиков всех времен, даже если бы он не написал ни одной строчки по теории относительности — предположение, за которое я должен попросить извинения, поскольку оно довольно абсурдно. Эйнштейновское понимание физического мира нельзя разделить на водонепроницаемые отделения, и нельзя даже вообразить, чтобы он мог пройти мимо одной из фундаментальных проблем современности.

Я здесь намереваюсь обсудить то важное, что внес Эйнштейн в статистические методы физики. Его публикации по этому предмету можно разделить на две группы: первая группа — ранние статьи, в них говорится о классической статистической механике, в то время как более поздние связаны уже с квантовой теорией. Обе группы тесно связаны с философией науки Эйнштейна. Он яснее, чем кто-либо до него, увидел статистическую основу законов физики и был пионером в исследовании тогда еще запутанных квантовых явлений. Однако позднее, когда его собственные работы послужили основой для синтеза статистических и квантовых принципов,

Впервые опубликовано в т. 3 «The Library of Living Philosophers», Albert Einstein: Philosopher — Scientist, 1949.

который казался приемлемым почти всем физикам, сам он был скептически настроен по отношению к этому синтезу. Многие из нас рассматривают это как трагедию и для него самого, поскольку он должен искать свой путь в одиночестве, и для нас, теряющих вождя и знаменосца. Я не беру на себя смелость предложить разгадку этого несоответствия. Мы должны считаться с фактом, что даже в физике принципиальные убеждения сильнее разумных доводов, как и во всякой другой человеческой деятельности. Моя задача — дать отчет о работе Эйнштейна и обсудить ее с моей собственной философской позиции.

Первая статья Эйнштейна 1902 года «*Kinetische Theorie des Warmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik*» [1] является замечательным примером того, что, когда пришло время, важные идеи развиваются различными людьми в отдаленных местах почти одновременно. Эйнштейн говорит в своем введении, что никому еще не удавалось вывести условия термического равновесия и второго закона термодинамики из вероятностных соображений, хотя Максвелл и Больцман подошли близко к этому. Виллард Гиббс не был им упомянут. В действительности статья Эйнштейна — это второе открытие всех существенных особенностей статистической механики и написана явно в полном неведении того факта, что весь вопрос был тщательно разобран Гиббсом годом ранее (в 1901 году). Правда, немецкий перевод Е. Цермело впервые вышел в 1905 году. Сходство совершенно удивительное. Подобно Гиббсу, Эйнштейн исследует статистическое поведение виртуального ансамбля одинаковых механических систем очень общего типа. Состояние отдельной системы описывается набором обобщенных координат и скоростей, который может быть представлен как точка в $2n$ -мерном «фазовом пространстве»; энергия дается как функция этих переменных. Единственное использованное следствие динамических законов — это теорема Лиувилля, согласно которой любая область в $2n$ -мерном фазовом пространстве всех координат и импульсов сохраняет во времени свой объем. Этот закон позволяет определить области равного веса и применить законы теории вероятностей. В действительности метод Эйнштейна, по существу, идентичен теории канонических ансамблей Гиббса. Во второй статье следующего года, озаглавленной «*Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik*» [2], Эйнштейн строит теорию на другой основе, не использованной Гиббсом, а именно на рассмотрении отдельной системы во времени (названной позднее «*Zeit-Gesamtheit*», временной ансамбль), и доказывает, что это эквивалентно некоторому виртуальному ансамблю многих систем, микроканоническому ансамблю Гиббса. В заключение он показывает,

что каноническое и микроканоническое распределения приводят к одним и тем же физическим выводам.

Эйнштейновский подход к вопросу кажется мне несколько менее абстрактным, чем подход Гиббса. Это подтверждается также тем фактом, что Гиббс не сделал никакого убедительного приложения своего нового метода, в то время как Эйнштейну сразу удалось применить свои теоремы к крайне важному случаю, а именно к системам, размер которых удобен для демонстрации реальности молекул и справедливости кинетической теории вещества.

Это была теория броуновского движения. Статьи Эйнштейна по этому вопросу сейчас легко доступны. Они изданы в виде небольшой книги с примечаниями Р. Фюрта (перевод на английский язык А.Д. Коупера [3]). В первой статье (1905) он показал, «что согласно молекулярно-кинетической теории теплоты взвешенные в жидкости тела, видимые через микроскоп, будут вследствие молекулярного действия теплоты испытывать смещения такой величины, что их можно легко наблюдать в микроскоп», и он добавляет, что эти движения, возможно, идентичны с «броуновским движением», хотя его знания о последнем слишком неопределенны, чтобы составить ясное суждение.

Основной шаг, предпринятый Эйнштейном, состоял в том, чтобы поднять кинетическую теорию вещества с уровня возможных, вероятных, полезных гипотез до уровня, когда возможно наблюдать; эта идея осуществлялась путем исследования случаев, в которых молекулярное движение и его статистический характер могут быть сделаны явными. Это — первый пример явления термических флуктуаций, и его метод — классический образец для обработки всех других. Он рассматривает движение взвешенных частиц как процесс диффузии под действием осмотического давления и других сил, среди которых трение из-за вязкости жидкости является наиболее важным. Логический ключ к пониманию явления состоит в утверждении, что действительная скорость взвешенной частицы, вызванная столкновениями с ней молекул жидкости, не наблюдаема; видимый эффект за конечный интервал времени τ состоит из нерегулярных смещений, вероятность которых удовлетворяет дифференциальному уравнению того же типа, что и уравнение диффузии. Коэффициент диффузии есть не что иное как средний квадрат смещения, деленный на 2τ . Таким путем Эйнштейн получил свой знаменитый закон, выражающий среднее квадратичное смещение за время τ через измеримые величины (температуру, радиус частицы, вязкость жидкости) и число молекул в грамм-молекуле (число Авогадро N). По своей простоте и ясности эта статья является классическим произведением нашей науки.

Во второй статье (1906) Эйнштейн ссылается на работу Зиден-топфа (Йена) и Гойи (Лион), которые благодаря наблюдениям пришли к убеждению, что броуновское движение вызвано термическим возбуждением молекул жидкости, и с этого момента он считает доказанным, что предсказанное им «нерегулярное движение взвешенных частиц» идентично с броуновским движением. Эта и следующие публикации посвящены разработке деталей (например, вращательное броуновское движение) и изложению теории в других формах. Но они не содержат ничего существенно нового.

Я думаю, что эти исследования Эйнштейна больше, чем все другие работы, убеждают физиков в реальности атомов и молекул, в справедливости кинетической теории теплоты и в фундаментальной роли вероятности в законах природы. Читая эти статьи, склоняешься к мысли, что в это время статистический аспект физики был преобладающим в голове Эйнштейна; однако в то же самое время он работал над теорией относительности, где господствует строгая причинность. Кажется, его убеждением всегда было и остается до сих пор, что наиболее глубокие законы природы причинны и детерминистичны, что вероятность необходима только для того, чтобы прикрывать наше невежество, когда нам приходится иметь дело с большим числом частиц, и что только глубина этого невежества выдвигает статистику на передний план.

Большинство физиков не разделяют сегодня этой точки зрения, и причиной этого является развитие квантовой теории. Вклад Эйнштейна в это развитие велик. Его первая, уже упомянутая статья 1905 года обычно цитируется как пример первого использования понятия световых квант (фотонов) для объяснения фотоэлектрического эффекта и подобных явлений (закон фотолюминесценции Стокса, фотоионизация и т. д.). В действительности основная аргументация Эйнштейна опять-таки статистического характера, и только что упомянутые явления использованы для ее подтверждения. Эта статистическая аргументация очень характерна для Эйнштейна и производит впечатление того, что законы вероятности являются для него центральными и намного более важными, чем любой другой закон. Он начинает с фундаментального различия между идеальным газом и полостью, наполненной излучением. Газ состоит из конечного числа частиц, в то время как излучение описывается набором функций в пространстве и, следовательно, бесконечным числом переменных. В этом состоит корень трудности объяснения закона излучения черного тела; монохроматическая плотность излучения оказывается пропорциональной абсолютной температуре (что позднее стало известным как закон Релея—Джинса) с коэффициентом, не зависящим от час-

тоты, и, следовательно, общая плотность становится бесконечной. Чтобы этого избежать, Планк выдвинул (1900) гипотезу о том, что излучение состоит из квантов конечного размера. Эйнштейн использовал, однако, не закон излучения Планка, а более простой закон Вина, который является предельным случаем для низкой плотности излучения, справедливо ожидая, что здесь корпускулярный характер излучения будет более очевидным. Он показывает, как можно получить энтропию S излучения черного тела из данного закона излучения (мономатрическая плотность как функция частоты), и применяет затем фундаментальное больцмановское соотношение между энтропией S и термодинамической вероятностью W :

$$S = k \log W$$

(где k есть газовая постоянная на молекулу) для определения W . Эта формула предназначалась Больцманом для того, чтобы выражать физическую величину S через комбинаторную величину W , полученную подсчетом всех возможных конфигураций отдельных элементов статистического ансамбля. Эйнштейн обращает этот процесс: он исходит из известной функции S , чтобы получить выражение для вероятности, которая может быть использована как ключ к интерпретации статистических элементов. (Такой же прием был применен им позднее в работе по термическим флуктуациям [4]; и хотя эта работа имеет большую практическую ценность, я лишь упомяну о ней, так как помимо этой «инверсии» она не вводит новых фундаментальных понятий.)

Подставляя энтропию, полученную из закона Вина, в формулу Больцмана, Эйнштейн получает для вероятности случайной концентрации полной энергии E в части αV полного объема V

$$W = \alpha^{E/h\nu};$$

это означает, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из $n = E/h\nu$ независимых квантов энергии величины $h\nu$. Из текста статьи очевидно, что этот результат имел для Эйнштейна непреодолимую силу убеждения и вынудил его искать прямое подтверждение. Он нашел его в упомянутых выше физических явлениях (например, фотоэлектрический эффект), общей чертой которых является обмен энергией между электроном и светом. Впечатление, которое произвели на экспериментаторов эти открытия, было очень велико, потому что самих фактов было известно много, но они не были связаны друг с другом. В то время способность Эйнштейна к выявлению таких связей была поистине непостижимой. Она была основана на доскональном

знании экспериментальных фактов в сочетании с глубоким пониманием современного состояния теории, которое дало ему возможность сразу видеть, где совершалось нечто необычное. Его работа в этот период по своему методу была, в сущности, эмпирической, хотя и направленной на построение последовательной теории — в противоположность более поздним работам, когда его все больше и больше вели философские и математические идеи.

Второй пример применения этого метода — работа по теплоемкости [5]. Эта работа начинается с теоретических соображений того типа, который имел для Эйнштейна наибольшую силу доказательства, а именно со статистики. Он отмечает, что формулу излучения Планка можно получить, отказавшись от непрерывного распределения статистического веса в фазовом пространстве, которое является следствием динамической теоремы Лиувилля. Вместо этого следует признать, что в колебательных системах того типа, которые в теории излучения были использованы в качестве поглотителей и излучателей, большинство состояний имеет исчезающий статистический вес и только избранное число (энергия которых есть целое кратное кванта) имеет конечные веса.

Если это так, то квант является особенностью не излучения, а общей физической статистики и, следовательно, должен появиться и в других явлениях, в которых участвуют колебания. Эти соображения, очевидно, оказали решающее влияние на ход мыслей Эйнштейна и стали особенно плодотворными благодаря его знанию фактов и безошибочному суждению о значении фактов для обсуждаемой проблемы. Мне не известно, знал ли он, что существуют твердые элементы, для которых удельная теплоемкость на моль меньше, чем ее нормальная величина — 5,94 калории, даваемая законом Дюлонга и Пти, или сначала у него была теория, а затем он изучил таблицы, чтобы найти примеры. Закон Дюлонга и Пти есть прямое следствие закона равнораспределения классической статистической механики, который устанавливает, что каждая координата или импульс, благодаря которым квадратичные члены входят в энергию, должны иметь одну и ту же среднюю энергию, а именно $\frac{1}{2}RT$ на моль, где R — газовая постоянная; так как R немного меньше, чем 2 калории на градус и моль, а осциллятор имеет 3 координаты и 3 импульса, энергия одного моля твердого элемента приблизительно должна быть равной $6 \times \frac{1}{2}RT$, или 5,94 калории. Если имеются вещества, для которых экспериментальная величина существенно ниже, как это действительно имеет место для углерода (алмаз), бора, кремния, то возникает противоречие между фактами и классической теорией. Другое такое противоречие имеет место в случае некоторых газов с многоатомными молекулами.

Друде доказал оптическими экспериментами, что атомы в этих молекулах совершают колебания относительно друг друга; следовательно, число колеблющихся единиц на молекулу должно быть больше 6, а тем самым значение теплоемкости должно быть выше, чем у Дюлонга—Пти. Но это не всегда так. Дальше Эйнштейн заметил, что с классической точки зрения непонятно, почему электроны не вносят никакого вклада в теплоемкость. В тот период колеблющиеся электроны в атоме были предложены для объяснения ультрафиолетового поглощения; в противоречии с законом равнораспределения они явно не давали вклада в теплоемкость.

Все эти трудности были сразу преодолены предположением Эйнштейна о том, что атомарные осцилляторы следуют не закону равнораспределения, а тому же самому закону, который ведет к формуле излучения Планка. Тогда средняя энергия не будет пропорциональна абсолютной температуре, но уменьшается с падением температуры более быстро по закону, который зависит еще от частот осцилляторов. Такие высокочастотные осцилляторы, как электроны, при обычной температуре не дают в теплоемкость никакого вклада, а только атомы, если они не слишком легкие и не слишком сильно связаны. Эйнштейн заявил, что эти условия удовлетворяются в случае многоатомных молекул, для которых Друде оценил частоты, и показал, что измерения теплоемкости алмаза довольно хорошо согласуются с его новыми формулами.

Но здесь не место обсуждать физические детали открытия Эйнштейна. Их значение для установления принципов научного познания было велико. Теперь доказано, что квантовые эффекты были не специфическим свойством излучения, а общей чертой физических систем. Старое правило «*natura non facit saltus*» («природа не делает скачков») было опровергнуто: существуют фундаментальные прерывности, кванты энергии, и не только в излучении, но и в обычном веществе.

В эйнштейновской модели молекулы или твердого тела эти кванты еще тесно связаны с движением отдельных колеблющихся частиц. Но вскоре стало ясно, что необходимо обобщение. Атомы в молекулах и кристаллах не независимы друг от друга, а прочно связаны. Поэтому движение индивидуальной частицы — это не движение отдельного гармонического осциллятора, а суперпозиция многих гармонических колебаний. Носитель простого гармонического движения вообще не является материальным; эта абстрактная «нормальная координата» (Normalcoordinate) хорошо известна из обычной механики. Для кристаллов, в частности, каждая нормальная координата есть стоячая волна. Введение этой идеи открыло путь к количественной теории

термодинамики молекул и кристаллов и продемонстрировало абстрактный характер новой квантовой физики, которая постепенно начала вырисовываться из этих идей. Стало ясно, что законы микрофизики существенным образом отличаются от законов вещества в массе. Никто не сделал больше, чем Эйнштейн, чтобы прояснить это. Я не могу здесь излагать все его работы, но ограничусь двумя выдающимися исследованиями. Они проложили путь для новой микромеханики, которую физика приняла сегодня целиком, в то время как сам Эйнштейн остается в стороне, критически, скептически настроенный и все еще надеющийся, что этот период минет, и физика вернется к классическим принципам.

Первое из этих двух исследований снова имеет дело с законом излучения и статистикой [6]. Существуют два подхода к проблемам статистического равновесия. Первый — непосредственный, который можно назвать комбинаторным методом: после установления статистического веса элементарных случаев вычисляют число комбинаций этих элементов, которое соответствует наблюдаемому состоянию. Это число есть статистическая вероятность W , из которой могут быть получены все физические свойства (например, энтропия по формуле Больцмана). Второй метод состоит в определении скоростей протекающих элементарных процессов, ведущих к рассматриваемому равновесию. Этот метод, конечно, намного труднее, так как требует не только подсчета равновероятных случаев, но и действительного знания действующего механизма. Но зато этот метод идет значительно дальше, он дает не только условия равновесия, но также ход во времени процессов, начинающихся с неравновесных условий. Классическим примером этого второго метода является формулировка Максвелла и Больцмана кинетической теории газов; здесь элементарный механизм дается двойными соударениями молекул, число этих соударений в единицу времени пропорционально плотности каждого партнера. Из «уравнения столкновений» можно определить функцию распределения молекул не только в статистическом равновесии, но также и для случая макроскопического движения, потока теплоты, диффузии и т. д. Другим примером является закон действия масс в химии, установленный Гульдбергом и Вааге; здесь снова элементарный механизм осуществляется многочисленными столкновениями групп молекул, причем атомы соединяются, расщепляются или обмениваются со скоростью, пропорциональной численной плотности партнеров. Специальным случаем этих элементарных процессов является одноатомная реакция, в которой молекулы одного определенного типа спонтанно разрываются со скоростью, пропорциональной их численной плотности. Этот случай имеет огромное значение в ядерной

физике: это закон радиоактивного распада. В то время как в немногих примерах обычной химии, где наблюдалась одноатомная реакция, можно было предполагать или даже наблюдать зависимость скорости реакции от физических условий (например, от температуры), в случае радиоактивности это не имеет места. Константа распада оказалась постоянным свойством ядра, которое не изменяется никакими внешними воздействиями. Каждое отдельное ядро распадается в момент, который не может быть предсказан. Но если наблюдать за большим числом ядер, то средняя скорость распада пропорциональна имеющемуся общему числу ядер. Это выглядит так, как если бы закон причинности терял свое действие для этих процессов.

Затем Эйнштейн показал, что закон излучения Планка можно свести к процессам подобного типа, более или менее некаузального характера. Рассмотрим два стационарных состояния атома, скажем, самое нижнее состояние 1 и возбужденное состояние 2. Эйнштейн считает, что если атом находится в состоянии 2, то он имеет некоторую вероятность возврата в основное состояние 1, излучая фотон такой частоты ν_{12} , которая, согласно квантовому закону, соответствует разнице энергий между обоими состояниями; то есть в большом собрании таких атомов число атомов в состоянии 2, возвращающихся в основное состояние 1 в единицу времени, пропорционально их начальному количеству — точно так же, как в случае радиоактивного распада. С другой стороны, излучение обуславливает некоторую вероятность для обратного процесса $1 \rightarrow 2$, который соответствует поглощению фотона с частотой ν_{12} и пропорционален плотности излучения для данной частоты.

Но только эти два процесса, уравнивающие друг друга, не привели бы к формуле Планка; поэтому Эйнштейн был вынужден ввести третий процесс, а именно влияние излучения на процесс эмиссии $2 \rightarrow 1$, «индуцированную эмиссию», вероятность которой опять-таки пропорциональна плотности излучения для частоты ν_{12} .

Это чрезвычайно простое соображение вместе с самым элементарным принципом статистики Больцмана сразу приводит к формуле Планка без какого-либо уточнения величин вероятностей переходов. Эйнштейн связал его с учетом переноса импульса между атомом и излучением и показал, что предложенный им механизм согласуется не с классическим представлением о сферических волнах, а только с выстрелообразным поведением квантов. Здесь мы хотим коснуться не этой стороны работы Эйнштейна, а ее значения для фундаментального вопроса о причинных и статистических законах в физике. С этой точки зрения эта статья Эйнштейна особенно важна. В самом деле, она означает решающий шаг в направлении некаузального, индетерминистского мышления.

Конечно, я уверен, что сам Эйнштейн был и остается убежденным в том, что в возбужденном атоме имеются структурные свойства, которые определяют точный момент излучения, и что вероятность привлекается только из-за нашего неполного знания предыстории атома. Однако фактом остается то, что он, по существу, содействовал распространению индетерминистского статистического мышления, его расширению из первоначального источника, радиоактивности, на другие области физики.

Следует упомянуть еще о другой особенности работы Эйнштейна, которая также значительно помогла сформулировать индетерминистскую физику в квантовой механике. Это тот факт, что из справедливости закона излучения Планка следует, что вероятности поглощения ($1 \rightarrow 2$) и индуцированной эмиссии ($2 \rightarrow 1$) равны. Это было первым указанием на то, что взаимодействие в атомных системах всегда связывает два состояния симметричным образом. В классической механике внешний фактор, подобный радиации, действует на одно определенное состояние, и результат действия можно рассчитать из свойств этого состояния и внешнего фактора. В квантовой механике каждый процесс есть переход между двумя состояниями, которые симметрично входят в выражение законов взаимодействия с внешним фактором. Это свойство симметрии было одной из решающих нитей, которые привели к формулировке матричной механики, самой ранней формы современной квантовой механики. Первым указанием на эту симметрию было открытие Эйнштейном равенства вероятностей переходов вверх и вниз.

Последним из исследований Эйнштейна, которое я хочу обсудить в этом докладе, является его работа по квантовой теории одноатомных идеальных газов [7]. В этом случае исходная идея принадлежала не ему, а индийскому физическому С.Н. Бозе; его статья появилась в переводе самого Эйнштейна [8], который добавил замечание относительно того, что рассматривает его работу как важную ступень в развитии физики. Существенным пунктом в методике Бозе является то, что он обращается с фотонами, как с частицами газа, с помощью методов статистической механики, но с той разницей, что эти частицы рассматриваются как неразличимые. Он не распределяет индивидуальные частицы по набору состояний, а считает число состояний, которые содержат данное число неразличимых частиц. Это комбинаторное соображение совместно с физическими условиями (данном является число состояний и общая энергия) сразу приводит к закону излучения Планка. Эйнштейн обобщил эту идею, добавив к ней предположение о том, что такой же ход мыслей должен быть применен к материальным атомам, чтобы получить квантовую теорию одноатомного газа. Отклонение от обычных законов для газов, выведенное из

этой теории, называется «вырождением газа». Статьи Эйнштейна об этом появились ровно за год до открытия квантовой механики. Одна из них содержит, кроме того (с. 9 второй статьи), ссылку на знаменитую диссертацию де Бройля и замечание о том, что с газом может быть связано скалярное волновое поле. Эти статьи де Бройля и Эйнштейна стимулировали Шрёдингера развить его волновую механику, как он признался сам в конце своей знаменитой статьи [9]. То же замечание Эйнштейна годом или двумя позднее послужило основой связи между теорией де Бройля и экспериментальным открытием электронной дифракции. В самом деле, когда Дэвиссон прислал мне свои результаты со странным максимумом, найденным в отражении электронов кристаллами, я вспомнил намек Эйнштейна и поручил Эльзассеру исследовать, нельзя ли интерпретировать эти максимумы как интерференционную картину волн де Бройля. Следовательно, Эйнштейн, несомненно, причастен к обоснованию волновой механики, и никакое алиби не может этого опровергнуть.

Я не могу представить, как подсчет равновероятных случаев Бозе — Эйнштейна может быть оправдан без понятий квантовой механики. Там состояние системы одинаковых частиц описывается не путем задания их индивидуальных положений и импульсов, а симметричной волновой функцией координат. Эта функция выражает совершенно очевидно только *одно* состояние. В классической же статистике группу одинаковых частиц, даже если они совершенно сходны, можно распределить между двумя ящиками многими способами; частицы могли бы быть индивидуально также неразличимы, но это не помешало бы тому факту, что они суть индивидуумы. Хотя аргументы такого рода скорее метафизические, чем физические, использование симметричной волновой функции для представления состояния кажется мне предпочтительным. Этот способ мышления привел, кроме того, к другому случаю вырождения газа, открытому Ферми и Дираком, где волновая функция является антисимметричной, и ко множеству физических следствий, подтвержденных экспериментом.

Статистика Бозе—Эйнштейна была, насколько я знаю, последним значительным положительным вкладом Эйнштейна в физическую статистику. Его дальнейшие усилия в этом направлении, хотя и представляли большую ценность, так как побуждали к дальнейшему размышлению и обсуждению, в основном были только критическими. Он отказался признать требование квантовой механики примирить корпускулярные и волновые аспекты излучения. Это требование основано на полной переориентации физических принципов: причинные законы заменяются статистическими, детерминизм — индетерминизмом. Я попытался показать, что Эйнштейн сам проложил путь для такой установки.

Однако в его философии содержится некоторый принцип, который заставляет его следовать по этому пути до конца. Что же это за принцип?

Философия Эйнштейна не изложена систематически в книге, которую вы могли бы прочитать; вы должны приложить усилие, чтобы извлечь ее из его статей по физике и из некоторых более общих статей и брошюр. Я не нашел у него никакого определенного ответа на вопрос: «Что такое вероятность?»; он не принимал также участия в дискуссиях, разгоравшихся по поводу определения Мизеса и других подобных попыток. Я предполагаю, что он отклонял их как метафизические спекуляции или даже подшучивал над ними. Сначала он использовал вероятность в качестве умственного орудия для исследования природы точно так же, как любой другой научный метод. Он определенно имел очень твердые убеждения по поводу ценности таких орудий. Его взгляды на философию и теорию познания хорошо описаны в его статье-некрологе об Эрнсте Махе [10]:

«Если я посвятил себя науке не по таким внешним причинам, как накопление денег, а также не ради или по крайней мере не исключительно ради удовольствия, наслаждения от умственной гимнастики, то меня как юнгу в этой науке должны жгуче интересовать вопросы: какова та цель, которую наука хочет и может достигнуть и которой я посвятил себя? Насколько «истинны» ее общие результаты? Что в ней существенно, а что покоится на случайностях развития?»

Дальше в той же статье он формулирует *свое эмпирическое кредо* в следующих словах:

«Понятия, которые оказались полезными в упорядочивании вещей, легко приобретают над нами такую власть, что мы забываем об их человеческом происхождении и принимаем их за неизменно данное. Тогда они становятся «необходимостями мышления», «данными априори» и т. д. Такими заблуждениями путь научного прогресса часто преграждается на долгое время. Поэтому если мы настаиваем на необходимости проанализировать давно установленные понятия и указать, от каких условий зависит их оправданность и возможность употребления, как они, в частности, возникают из данных опыта, то это не праздная забава. Этим самым разбивается их преувеличенная власть. Их устраняют, если они не могут должным образом себя узаконить; исправляют, если их соответствие данным предметам было установлено слишком небрежно; заменяют другими, если может быть развита новая система, которую мы по каким-либо причинам предпочитаем».

Это — сущность молодого Эйнштейна. Я уверен, что принципы вероятности были для него того же рода, как и все другие понятия, которые применяются для описания природы и которые так выразительно сформулированы в приведенных выше словах. Нынешний

Эйнштейн изменился. Я приведу здесь отрывок из его письма, которое я получил несколько лет назад (7 ноября 1944 года): «В нашем научном ожидании мы выросли антиподами. Ты веришь в Бога, играющего в кости, а я — в полную закономерность в мире чего-то объективно существующего, и эту закономерность я пытаюсь уловить дико спекулятивным способом». Эти спекуляции, конечно, отличают его работу от того, что он писал раньше. Но если вообще кто-нибудь и имеет право спекулировать, то это именно он, чьи фундаментальные результаты стоят подобно скале. То, что он преследует, — это общая теория поля, которая сохраняет строгую причинность классической физики и ограничивает вероятность, отведя ей роль прикрытия нашего незнания начальных условий или, если угодно, предыстории всех элементов рассматриваемой системы. Здесь не место спорить о том, можно ли этого достигнуть. Однако я хочу сделать одно замечание, используя образный язык самого Эйнштейна: если Бог и сотворил мир в виде совершенной механической системы, то нашему несовершенному разуму он позволил по меньшей мере столько, что для предсказания малой части процессов в этой системе мы, безусловно, не должны решать бесчисленные дифференциальные уравнения, а с надеждой на успех можем взять игральные кости. То, что это так, я узнал вместе со многими из моих современников от самого Эйнштейна. Я думаю, что ситуация сильно не изменилась из-за введения квантовой статистики. Мы, смертные люди, все еще играем в кости для наших маленьких целей прогноза, а действия Бога в классическом броуновском движении таинственны также, как и в радиоактивности, и в квантовом излучении или вообще во всей жизни.

Недовольство Эйнштейна современной физикой было проявлено не только в общих выражениях, на что можно было бы ответить таким же общим и неопределенным образом, но также в очень конкретных статьях, в которых он сформулировал возражения против определенных положений волновой механики. Наиболее известной статьей такого рода является статья, опубликованная в сотрудничестве с Подольским и Розеном [11]. Тот факт, что она очень глубоко входит в логические основы квантовой механики, явствует из той реакции, которую она вызвала. Подробно ответил Нильс Бор. Опубликовал свои скептические взгляды на интерпретацию квантовой механики Шрёдингер. Рейхенбах рассматривает эту проблему в последней главе своей превосходной книги «Философские основы квантовой механики», в которой он показывает, что полный анализ трудностей, указанных Эйнштейном, Подольским и Розеном, требует пересмотра самой логики. Он вводит «трехзначную логику», в которой наряду с истинными значениями «истинный» и «ложный» существует еще и

промежуточное, которое он называет «неопределенный», другими словами, он отвергает старый принцип «tertium non datur» («третьего не дано»), чего требовали уже раньше по чисто математическим причинам Брауер и другие математики. Я не логик и в таких спорах всегда верю тому специалисту, который говорил со мной последним. На мое отношение к статистике в квантовой механике едва ли влияет формальная логика, и я полагаю, что то же самое справедливо для Эйнштейна. То, что его точка зрения по этому вопросу отличается от моей, достойно сожаления, но это не является предметом логического диспута между нами. Основа этого расхождения — в различном общем опыте, в наших трудах и в нашей жизни. Но несмотря на это он остается моим высокочтимым учителем.

Литература

1. «Ann. Phys.» (4 Reihe), 9 (1902), S. 477.
2. «Ann. Phys.» (4 Reihe), 11 (1903), S. 170.
3. *Furth R.*, Schwankungserscheinungen in der Physik, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig (1920); *Cowper A.D.*, Investigations on the Theory of the Brownian Movement, Methuen & Co., London (1926).
4. «Ann. Phys.» (4 Reihe), 19 (1906), S. 373.
5. «Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme», «Ann. Phys.» (4 Reihe), 22 (1907), S. 180.
6. «Zur Quantentheorie der Strahlung», «Phys. Z.», Jg. 18 (1917), S. 121.
7. «Berliner Ber.», 1924; 1925, S. 318.
8. *Bose S.N.*, «Z. f. Phys.», 26 (1924), S. 178.
9. «Quantisierung als Eigenwertproblem», «Ann. Phys.» (4 Reihe), 70 (1926), S. 361, vgl. S. 373.
10. «Phys. Z.», 17 (1926), S. 101.
11. *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.*, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? «Phys. Rev.», 47 (1935), S. 777.

1949 г.

М. Борн

Воспоминания об Эйнштейне

Я охотно принял ваше дружеское приглашение прочитать доклад об Эйнштейне, ибо мне доставляет радость вспомнить о встречах с ним и рассказать о связанных с ним больших переживаниях.

Я познакомился с Эйнштейном в 1909 году в Зальцбурге во время конгресса естествоиспытателей, спустя четыре года после появления трех его выдающихся работ (в седьмом томе «*Annalen der Physik*», 1905), которые сразу поставили его в ряд ведущих физиков. Одна из этих наиболее известных работ излагает теорию относительности, в то время как две другие касаются броуновского движения и идеи световых квант.

Вначале мы были мало знакомы друг с другом, и наша связь ограничивалась лишь случайными письмами о научных проблемах. Это относилось к специальной теории относительности — о чем я расскажу позже — а затем и к квантовой теории. Значение его работы о световых квантах я понял только много позже. Только эйнштейновская теория удельной теплоты, относящаяся к 1907 году, раскрыла мне глаза. Я, как и многие физики того времени, был убежден, что планковская идея о квантах является только рабочей гипотезой, которая сослужила полезную службу, но скоро должна быть устранена или сведена к обычным понятиям теоретической физики. И вот когда мой друг Теодор фон Карман и я пытались усовершенствовать простую формулу Эйнштейна для энергии кристалла путем учета связи атома, для нас стало ясно, что носителем монохроматических колебаний в молекулах и кристаллах является не вещественный атом, а абстрактные нормальные координаты

«*Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*», IX (1956), S. 97. (Доклад, прочитанный на годовичном собрании Немецкого союза содействия математическому и естественнонаучному образованию в Ганновере 4 апреля 1956 года. — *Ред.*)

всей системы. Оглядываясь назад, мы могли бы сказать, что это было безупречное косвенное доказательство ограниченной применимости классической механики Ньютона. Но насколько я помню, мы тогда не испытывали большого интеллектуального потрясения, а переживали только радость по поводу того, что найдено нечто новое, — радость, которая была немного приглушена тем, что в то же самое время Петер Дебай получил тот же результат. Только обсуждение этого вопроса в переписке с Эйнштейном разъяснило мне важность проблемы. К сожалению, от этой переписки ничего не сохранилось. В личном плане мои исследования колебаний в кристаллической решетке имели для меня более практическое значение; они раскрыли для меня новую собственную область работы, кинетическую теорию твердых тел, которая хотя и не проникала в глубину последних принципов, но вела к большой и сегодня еще не исчерпанной области частных исследований. Мои первая (1915) и последняя (1955) книги представляют собой изложение этой области.

Более близко я познакомился с Эйнштейном только в 1915 году, когда при содействии Макса Планка был приглашен в Берлин в качестве экстраординарного профессора. Эйнштейн уже с 1913 года состоял в Прусской академии в качестве преемника Вантгоффа. Вскоре я его встретил. Но была война, я должен был стать солдатом и на время исчезнуть. Таким образом, это знакомство не привело к более близкому общению, пока я, спустя почти год, не был переведен в Артиллерийскую комиссию по испытаниям. Служебное помещение находилось совсем рядом с домом, где жил Эйнштейн, и мы виделись теперь часто, а временами почти ежедневно. После того как я утвердился в военном ведомстве, я нашел время для того, чтобы снова начать свою научную работу. В моем письменном столе имелось два выдвижных ящика, один был полон бумаг по звукометрии, в области которой я работал вместе с десятком других военнообязанных физиков, а в другом лежали мои собственные исследования: корректуры моей первой книги по динамике кристаллических решеток (*Dynamik der Kristallgitter*), а позднее — новые исследования по вопросам оптики и кристаллофизики. За другими столами в той же комнате сидели Эрвин Маделунг, впоследствии ставший моим преемником во Франкфурте, и Альфред Ланде, ныне профессор Колумбийского университета в Огайо. Они также устроили в своих столах двойные ящики. Мы были совершенно гарантированы от того, чтобы наш майор заметил различие между акустическими формулами по звукометрическим методам и другими нашими иероглифами. В этих условиях было произведено первое вычисление маделунговской константы, которую мы с Ланде использовали для решения нашей проблемы при вычислении

энергии ионной решетки и применении этих результатов к определению физических констант и теплоты химических связей. Эйнштейн принял наши работы для опубликования в Берлинской академии. Когда спустя несколько дней я посетил нашу комнату в Артиллерийской комиссии, я нашел Ланде в отчаянии: в формуле для энергии мы забыли учесть фактор $\frac{1}{2}$ — оплошность, от которой предостерегается каждый новичок в теоретическом семинаре. Наш результат оказался настолько неверным, что мне ничего больше не оставалось, как в обеденный перерыв сбежать к Эйнштейну и просить его вернуть работу назад. В первый раз я услышал тогда его великолепный хохот; смех немного смутил меня, но не расстроил. Затем он сказал: «Ваш результат в числовом отношении может быть и неверен, но по существу все в порядке — стоит только немного подумать, и вам уже придет на ум, что означает забытый фактор $\frac{1}{2}$ ». Так и произошло. Именно математическая ошибка привела нас к правильной физике, и работа была спасена. Речь опять идет об отказе от классической механической модели (она дает только половину наблюдаемого значения энергии решетки), и это было новой вехой на пути к построению квантовой теории. Не следует падать духом, если не сразу ясно, что разумная идея соответствует истине, — это поучение из уст Эйнштейна много раз мне помогало в дальнейшем.

Но вы ведь хотите услышать не о моих незначительных работах, а о великих идеях Эйнштейна. Эти идеи концентрировались тогда вокруг общей теории относительности, и хотя я уже годы прилагал усилия, однако ее смысл я постиг только из обсуждения с Эйнштейном.

Что касается специальной теории относительности, то я был ее знатоком со студенческих лет. Она ведь не была создана из ничего одним Эйнштейном, как это часто утверждается в популярных изложениях. Проблема относительности медленно выкристаллизовывалась из наблюдаемых фактов, формальный математический аппарат отыскивался Фицджеральдом, Лармором, Пуанкаре и Лоренцом. В том же 1905 году, в котором появилась первая работа Эйнштейна по теории относительности, я принимал участие в геттингенском семинаре, руководимом Гильбертом и Минковским; в этом семинаре основательно обсуждался весь этот комплекс вопросов. Вклад Минковского состоял в наброске идей, которые он опубликовал в своей большой статье в «*Gottingen Nachrichten*» в 1907 году; в популярной форме эти идеи стали известны благодаря докладу «Пространство и время» на конференции естествоиспытателей в Кельне в 1908 году. Тем временем я вернулся из Геттингена на свою родину во Вроцлав и работал по релятивистским проблемам, которые касались уравнения движения электрона. Об этом я говорил со своими друзьями. Один из них, поляк Станислав Лориа, который позднее стал первым польским

профессором во Вроцлаве, обратил мое внимание на работы Эйнштейна. Для меня идея относительности была совершенно привычна. Я использовал найденный Минковским метод, в котором пространство и время обобщаются в четырехмерное квазиевклидово многообразии, в «мир» событий; этот метод вообще скоро получил признание как соответствующий для решения проблемы. И все же для меня, как и для многих других, работы Эйнштейна были откровением, потому что только благодаря им был раскрыт глубокий смысл преобразований Лоренца и в физику был введен новый философский метод рассмотрения. Эта философия учит, что утверждения, которые принципиально недоступны экспериментам, должны расцениваться как сомнительные и по возможности из физики удаляться. В случае теории относительности речь идет о таких утверждениях, как утверждение о том, что тела имеют в пространстве определенное положение и скорость или что два события в различных местах одновременны. Вопрос об абсолютном месте и абсолютном пространстве со времени Ньютона обсуждался много раз. Существенно новым в идеях Эйнштейна было распространение релятивистской критики на время. Идея о конечности скорости света явилась как следствие того, что утверждение, будто два события в различных местах одновременны, не имеет доступного опытной проверке содержания. Ныне каждый студент знает об этом из элементарных лекций и не видит никаких трудностей для понимания эйнштейновского определения относительной одновременности. Да я уверен, что это понятно также и ученикам старших классов, и этому можно радоваться. Но тогда, пятьдесят лет назад, эта идея была новой и встречала возражения не только у неспециалистов, но и у физиков и философов, которые не могли освободиться от традиционных представлений. Сам Лоренц до конца своей жизни не вполне примирился с тем, что не существует никакого покоящегося эфира как носителя электромагнитного поля и волн. И все же именно он разработал математические основы теории, названные преобразованиями Лоренца. Отличие Эйнштейна от Лоренца и Пуанкаре состоит в том, что они развивали теорию из максвелловых уравнений электромагнитного поля, в то время как Эйнштейн показал, что она может быть обоснована на гораздо более общих теоретико-познавательных принципах. Важно то, что Эйнштейн к этому времени уже знал, что максвеллова теория света должна рассматриваться лишь как приближение к действительности: это показывает его работа о световых квантах, появившаяся в том же 1905 году.

Проблемы световых квантов также обсуждались в наших беседах. Эйнштейн был глубоко обеспокоен двойственностью волна — частица, которая здесь впервые выявилась. Статистическую трактовку, которая

ныне принимается не только для света, но и для электронов и вообще других частиц, согласно которой квадрат амплитуды волны определяет плотность вероятности для появления частиц, Эйнштейн высказывал уже тогда, но вскоре отбросил, потому что он строго придерживался каузально-детерминистского способа описания классической физики. Об этом я скажу еще кое-что, но позднее.

Общая теория относительности покоится на использовании того же философского принципа, который привел к специальной теории. Речь идет об обобщении идеи относительности на ускоренные системы отсчета. Ключ к этому Эйнштейн открыл в известном со времен Ньютона факте, что все тела испытывают в поле тяжести одно и то же ускорение, или что, как говорят, тяжелая и инертная массы равны. Из этого следует, что наблюдатель, находящийся в замкнутом ящике, никаким путем не может установить, создается ли ускоренное движение тела в ящике внешним полем тяжести в покоящемся ящике или же ускорением всего ящика без участия поля тяжести. Таким образом, уже в 1907 году Эйнштейн пришел к формулировке принципа эквивалентности, согласно которому тяжесть и ускорение для всех процессов природы неразличимы, или эквивалентны, то есть различные трактовки обязаны одному и тому же существу дела. Однако потребовались усилия многих лет, вплоть до 1915 года, чтобы эти идеи превратить в единую замкнутую в себе теорию. При содействии своего старого друга со студенческих лет, Марселя Гроссмана, он нашел надежное математическое орудие в геометрии Римана и ее последующем развитии геометрами Риччи и Леви-Чивита. Эйнштейновская релятивистская теория тяготения — это, пожалуй, наиболее великое достижение человеческого мышления в познании природы, удивительное соединение философской глубины, физической интуиции и математического мастерства.

Для нас, которые воспитывались в догматической вере в ньютоновскую механику, характерной для XIX века, было нелегко принять эйнштейновские идеи, и не каждому выпало счастье, как мне, учиться непосредственно у него самого. Несмотря на это преимущество я никогда не отваживался посвятить себя работе в области общей теории относительности. Она казалась мне слишком грандиозной и величественной для моих сил и вместе с тем слишком далекой от обычной физики и слишком мало подкрепленной наблюдениями.

Объяснение движения перигелия Меркурия является единственным совершенно бесспорным ее опытным подтверждением; оба доступных проверке оптических эффекта (отклонение

светового луча от звезды Солнцем и красное смещение спектральных линий), несомненно, налицо, но вопрос о количественном соответствии теории и наблюдения все еще дискутируется. Существенную роль общая теория относительности играет в космологии, учении о бытии и становлении Вселенной. Сам Эйнштейн дал толчок к этому своей работой от 1917 года, возникновение идеи которой я наблюдал еще в Берлине; в ней были обобщены уравнения гравитационного поля (введением так называемого космологического члена), решением которых является конечное замкнутое пространство, — идея чрезвычайно смелая и важная. Благодаря ей требование Эрнста Маха, чтобы закон инерции рассматривался не как свойство пустого пространства, а как результат взаимодействия всех тел мира, получило физический смысл. Это разрешило загадку, почему звездная система не рассеялась уже давно в бесконечность, и привело в конце концов к объяснению совершенно новых астрономических фактов. Американский астроном Е.П. Хаббл открыл, что слабые туманности, которые на самом деле представляют собой звездные системы такой же величины, как и наш Млечный путь, обнаруживают красное смещение спектральных линий, которое тем больше, чем дальше туманности удалены. Если объяснить это смещение как эффект Допплера, то можно прийти к выводу, что вся звездная система соразмерно со временем расширяется. На самом деле оказывается, что существуют решения эйнштейновских уравнений поля, выражающие этот процесс*. Тем самым теория относительности праздновала свой величайший триумф, и была установлена ее связь с опытом.

Но тогда в Берлине мы еще совершенно не догадывались об этом удивительном подтверждении идей Эйнштейна. Это было чистым умозрением, которое отвлекало его, а также и меня от забот и хлопот повседневной жизни. В то время в мире бушевала война, нас окружали страдания, голод и ужас, и наши беседы часто соскальзывали на политику и мировые события.

Говорить об этом было тяжело, ибо взгляды Эйнштейна не были созвучны со взглядами нормального немецкого бюргера. В социально-политической области он шел своими собственными путями, как и в науке. Позвольте мне остановиться на его жизненном пути.

Эйнштейн родился 14 марта 1879 года в Ульме. Но его родители уже в 1880 году переселились в Мюнхен. Они были евреями, но совершенно нерелигиозными и позволили сыну посещать католичес-

* Об открытии этих решений сообщили, кроме Эйнштейна, В. де Ситтер (1917), Г. Вейль (1923), А. Фридман (1922), Г. Леметр (1927) и Г.П. Робертсон (1929).

кую начальную школу. Уже в ранние годы он показал неукротимую волю к независимости. Он ненавидел игру в солдаты, потому что это означало насилие. По его собственным рассказам, он уже в юношестве осознал ничтожество надежд и стремлений людей, которые, как он выражался, всю жизнь неумоимо охотились за тем, чтобы удовлетворить свой желудок, в то время как идеи и чувства ущемлялись. «В то время выход отсюда давала прежде всего религия, которая насаждалась ведь в каждого ребенка традиционной машиной воспитания». Так и он, еще ребенком, стал глубоко религиозным, но уже к двенадцати годам его религиозности внезапно пришел конец. Я процитирую одно место из его краткой автобиографии*, которую он называет собственноручно написанным некрологом: «Чтение научно-популярных книг привело меня вскоре к убеждению, что в библейских рассказах многое не может быть верным. Следствием этого было прямо-таки фантастическое свободомыслие, соединенное с выводами, что молодежь умышленно обманывается государством; это был потрясающий вывод. Такие переживания породили недоверие ко всякого рода авторитетам и скептическое отношение к верованиям и убеждениям в окружавшей меня тогда социальной среде. Этот скептицизм никогда меня уже не оставлял, хотя и потерял свою остроту впоследствии, когда я лучше разобрался в причинной связи явлений». Таким образом, потерянный религиозный рай был его первой попыткой освободиться от оков «исключительно личного». Наивысшей целью казался ему, наполовину сознательно, наполовину бессознательно, мысленный охват существующего вне человека мира в рамках доступных ему возможностей. У него было творческое мышление, которое проявлялось в его способности удивляться, видеть чудеса в повседневном.

Одно такое чудо он увидел еще в детстве: когда ему было лет пять, отец показал ему компас. То, что стрелка компаса без всякого видимого внешнего воздействия сохраняла свое направление, показывало, что позади вещей должно стоять нечто глубоко скрытое. Позднее, в возрасте двенадцати лет, он увидел чудо другого рода: книжку по евклидовой геометрии на плоскости, из которой он узнал, что вовсе не очевидные утверждения (например, пересечение трех высот треугольника в одной точке) могут быть доказаны с такой достоверностью, что всякое сомнение кажется исключенным.

* «A. Einstein, Philosopher and Scientist», Library of Living Philosophers, vol. 7.

Здесь мы видим существо его интеллекта: полная независимость от авторитета, безразличие к материальной выгоде, умение видеть удивительное в простейших явлениях природы и вера в силу анализирующего мышления. К этому надо добавить еще и ряд его моральных качеств: сочувствие к судьбам людей, готовность помочь, вместе с тем глубокая антипатия к обязательствам, которые накладываются обществом, любовь ко всему красивому в природе и искусстве, особенно в музыке.

К вере в персонального бога он не возвращался. Позднее он признавал бога Спинозы, который проявлялся в закономерностях природы. В статье «Wissenschaft und Religion» («Наука и религия»), опубликованной в 1940 году, он писал: «К религии относится вера в то, что мир явлений управляется по законам разума и что этот мир постигается разумом. Я не могу себе представить подлинного естествоиспытателя без крепкой веры в это. Образно эту взаимосвязь можно пояснить так: естествознание без религии парализовано, но религия без естествознания слепа».

В упомянутой автобиографии Эйнштейн много говорит о своем духовном развитии, но ни одного слова — о своем образе жизни. Я тоже упомяну здесь только о таких сторонах его жизни, которые дают нам более близкое понимание его сущности. К этому относится то, что при своем отъезде он отказался от немецкого подданства и одновременно вышел из еврейского религиозного общества. В Швейцарии он чувствовал себя хорошо и позднее принял швейцарское гражданство. После окончания кантональной школы в Аарау и Политехникума в Цюрихе он получил небольшую должность в швейцарском бюро патентов в Берне, благодаря которой он впервые избавился от тяжелой нужды. Там появились его упоминавшиеся в начале великие работы. Затем последовал его быстрый взлет, профессура в Цюрихском и Пражском университетах и в Цюрихском политехникуме и, наконец, приглашение в Берлинскую академию.

Он возвращался в Германию не с легким сердцем. Макс Планк и Вальтер Нерст сами выезжали в Цюрих с целью уговорить его, чтобы он согласился на это возвращение. Слава Прусской академии, перспектива вести научную работу без обязанностей преподавать, его стремление получить возможность войти в контакт с лучшими специалистами, наконец, и личные мотивы — его ранний брак не был счастливым — преодолели его сомнения относительно возвращения в Германию.

В академии и в университете он нашел все, что ожидал. Нельзя, пожалуй, сказать, что он чувствовал себя чужим или одиноким; как

всегда, он жил спартанской жизнью, был дружелюбен со всеми, но и заботился о сохранении своей независимости. Когда спустя год разразилась война, он с прискорбной усмешкой наблюдал за неистовством масс и отказался подписать известный «манифест девяноста двух немецких интеллигентов», в котором они объявили о своей солидарности с немецким милитаризмом. Только тот факт, что он был швейцарским подданным, избавил его от обвинения в предательстве.

Уже тогда начали создаваться группировки за и против него. Он никогда не отказывался от своего мнения, но и не навязывал его никому. Но было известно, что он был пацифистом, милитаристские решения считал бессмысленными, а в победу немцев не верил. К концу войны ряд выдающихся людей, среди которых были историк Дельбрюк, экономист Brentano, Эйнштейн и другие, организовали собрание, на которое пригласили высших чиновников министерства иностранных дел. На обсуждение был поставлен вопрос о военных действиях подводных лодок, неограниченного расширения которых требовал главный военный штаб, что неминуемо должно было привести к вступлению в войну Америки. Эйнштейн уговаривал меня принять участие в этом собрании, чего я как офицер, в сущности, не имел права делать. Среди них я был самым молодым и никогда не раскрывал рта. Эйнштейн выступал часто, спокойно и ясно, как если бы речь шла о теоретической физике. Но эти попытки воздействовать на военных руководителей не принесли ничего, и события шли своим чередом.

В свой первый визит к нам Эйнштейн принес скрипку, чтобы вместе со мной сыграть сонату. Мою жену, которую он не знал, он приветствовал словами: «Я слышал, что у вас только что родился ребенок». Затем он сложил свои свертки, положил их в угол и начал пилить. Любимым композитором тогда был Гайдн.

Однажды жена, приглашая Эйнштейна на обед, изложила в стихах некоторые идеи общей теории относительности. Это придало нашему общению безобидно-веселый тон. Эйнштейн и сам при случае раздражался комическими стихами. Общение с ним приносило ощущение счастья, потому что чувствовалось, как совершенно независим он был от своего «Я». Однажды, когда он был тяжело болен, моя жена спросила его, есть ли у него страх перед смертью, он ответил: «Я чувствую себя настолько солидарным со всем живущим, что для меня безразлично, где начинается и где кончается отдельное». Он выздоровел благодаря самоотверженному уходу его кухни Эльзы, которая потом стала его второй женой. Благодаря ей его быт стал более мешанским и уютным. Но и в домашнем кругу

заботливой фрау Эльзы он сохранял свой спартанский образ жизни. В его маленькой комнате не было никаких покрывал, ковров, картин — только кровать, стол, стул, книжный шкаф с несколькими книгами и несколько пачек оттисков. Любое имущество было ему в тягость, и в стремлении к обладанию собственностью он видел самую глубокую основу для ссор и войн между людьми. Культ государственной власти и технической мощи был ему точно так же противен, как милитаризм и фашизм. Незадолго до своей смерти он напомнил мне в письме о небольшом приключении, которое произошло в конце войны, в ноябре 1918 года.

Часть Берлина была в руках советов рабочих и солдатских депутатов. Студенты тоже образовали такой совет, который запер ректора и нескольких профессоров. Эйнштейна, которому приписывали влияние на студентов, просили быть посредником. Я только что выздоровел после гриппа, страдал от недостаточного питания и был еще слаб. В то время трамваи и автобусы не ходили. Но я обещал и к назначенному времени проделал огромный путь из дальнего пригорода, где я жил, на квартиру Эйнштейна в баварском квартале. Там к нам присоединился Макс Вертгеймер, один из основателей гештальтпсихологии. И вот мы побрели по безлюдным улицам в далекий путь к зданию рейхстага, где заседал совет. Оно было окружено огромной возбужденной толпой людей, сквозь которую было трудно пробраться. Еще труднее было пройти через караульный пост, который охранялся людьми с красными повязками на руках. Наконец мы прошли с помощью удостоверения одного журналиста, который узнал Эйнштейна. Через длинный коридор мы попали в маленький зал, в котором заседал студенческий совет. После краткого приветствия председатель просил нас присесть и немного подождать, так как он сейчас занят важным делом — реорганизацией студенческих занятий. Так мы сидели довольно долго и слушали. Наконец Эйнштейн потерял терпение и вежливо спросил, нельзя ли уладить наше простое дело. Мы ожидали, что так и будет, но председатель спросил, не хочет ли Эйнштейн высказаться относительно нового постановления. С приветливой улыбкой Эйнштейн сказал приблизительно следующее: «Я всегда завидовал тому, что немецкие студенты обладают академической свободой. Мне было бы жаль, если бы она была заменена предписаниями и ограничениями». Последовало смущенное молчание юного законодателя. Нам разъяснили, что в нашем деле они некомпетентны, и отослали нас к новому правительству. Слишком долго описывать, как мы добирались до Вильгельмштрассе и дворца рейхсканцлера, где возбужденные группы депутатов и служащих обсуждали внутреннее положение и только что объявленные условия перемирия. Поскольку Эйнштейна

знали, двери перед ним открывались; мы пробрались к Эберту и изложили ему свою просьбу. А затем начался бесконечный обратный путь. Но игра стоила свеч.

Вскоре после этого я покинул Берлин и переехал во Франкфурт; тем самым закончилось мое тесное общение с Эйнштейном. Но мы продолжали регулярно переписываться и часто виделись. Это было время, когда Эйнштейн внезапно получил мировую известность и вокруг его личности сконцентрировались научные и политические споры.

До того времени теория относительности была делом физиков и некоторых интересующихся физикой философов. Теперь вдруг она стала предметом всеобщего интереса, который в газетах находил отражение в виде сенсационных заголовков. Англичане сразу же после войны организовали при содействии Артура Эддингтона несколько экспедиций по наблюдению солнечных затмений с целью проверить утверждение Эйнштейна об отклонении светового луча в поле тяготения Солнца. 6 ноября 1919 года на торжественном заседании Королевского общества был обнародован результат: полное подтверждение предсказания Эйнштейна. Впечатление от этого события было огромным. Учение Исаака Ньютона, которого Королевское общество с полным основанием почитало как своего самого великого президента, после 200 лет неограниченного господства отступало перед фундаментальной теорией Эйнштейна. Британцы предприняли большие усилия и затраты, чтобы доставить материал для доказательства правильности этого нового учения. Подтвердилось то, что наука имеет интернациональный характер и что политические барьеры устарели. Люди, которые в годы нужды, убийственной борьбы, лжи и клеветы потеряли всякую веру в высшие ценности, обрели новую надежду, узнав о существовании простого, скромного человека, который среди этого ада спокойно рассуждал о сущности пространства, времени и материи и приоткрыл покрывало над тайной мироздания. Каждый хотел знать, что, собственно, заключает в себе эта теория относительности. Но это вовсе не было так просто. О теории Эйнштейна выходило множество статей и книг. Я тоже написал книгу, довольно популярную в то время, которая, впрочем, опять появилась сейчас в модернизированном издании на английском языке в Америке.

Но много было и противников. Среди них попадались честные люди, которые держались унаследованных представлений, руководствуясь внутренними побуждениями, но были и другие, которым претили общественные и политические взгляды Эйнштейна, его еврейское происхождение, его свободомыслие, его антимилитаризм и

пацифизм. К сожалению, среди этих людей, смешивавших науку и политику, было и несколько ведущих немецких физиков, прежде всего Филипп Ленард и Иоганн Штарк. В 1921 году на съезде естествоиспытателей в Бад Наугейме произошло большое прямо-таки неприятное столкновение. Эйнштейн жил тогда в моем доме во Франкфурте, и это был, пожалуй, единственный случай, когда я видел его очень раздраженным. Почти всегда он сохранял свое хладнокровие и веселость. Но он знал, что все его наилучшие коллеги по профессии стоят на его стороне.

Немецкая теоретическая физика находилась в то время в наивысшем расцвете. В Берлине одновременно работали Альберт Эйнштейн, Макс Планк и Макс Лауэ, а когда Планк в 1928 году покинул свою кафедру, прибыл еще и Шрёдингер. Какая плеяда больших имен! Между Эйнштейном и его коллегами развилась дружба, пережившая все перипетии частной и политической жизни. Что бы ни случилось, эта дружба помогала отбивать атаки против Эйнштейна. Постепенно они затихли, по крайней мере внешне; физика стала полностью релятивистской — я напомним только зоммерфельдовское релятивистское обобщение боровской теории водородного атома — а многие философы, которые не могли с этим мириться, становились на ту точку зрения, что метафизике нет дела до тривиальных представлений естествоиспытателя. Так жизнь и работа Эйнштейна в Берлине протекали спокойно и в общем благоприятно. Но враждебное отношение к нему тлело под пеплом до тех пор, пока не вспыхнуло открыто в 1933 году.

В этот период Эйнштейн начал свою работу по единой теории поля. Об этом я ничего не скажу, потому что в его программу объединить поле гравитации и электромагнетизм единым математическим аппаратом я никогда не верил и потому его труды, посвященные этому вопросу, пристально не изучал. Но я хотел бы упомянуть о фундаментальном вкладе Эйнштейна в квантовую теорию. В 1913 году появилась боровская трактовка строения атомов и их спектров с точки зрения квантовой теории. После нее уже нельзя было сомневаться, что основные идеи квантовой теории были справедливы. Классическая механика в атомной области оказалась несправедливой, следовало отыскать новую механику. По этому поводу Эйнштейн в уже упомянутом «собственноручно написанном некрологе» сказал: «Все мои попытки приспособить теоретические основы физики к этим результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы

оказалось достаточно, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главные законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это кажется мне чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли».

В теории Бора классическая каузальность для процессов эмиссии и абсорбции света исключается. Квантовые скачки между стационарными состояниями могут описываться только статистически, аналогично тому, как и известная теория радиоактивного распада.

Хотя Эйнштейн ни на одно мгновение не верил в то, что этим сказано последнее слово, он все же содействовал этой трактовке, показав в 1916 году, каким образом закон излучения Планка может быть выведен из статистики переходов между стационарными состояниями. Эти соображения целиком лежат в том направлении, которое в конечном счете привело к квантовой механике Гейзенберга.

Другая работа Эйнштейна, относящаяся к 1924 году, может рассматриваться как предшествующая волновой механике Шрёдингера. Индийскому ученому Бозе удалось показать, что изменение состояний фотонного газа, рассматриваемых как равновероятные, может с помощью планковской формулы излучения пониматься как уравнение теплового состояния этого газа. Эйнштейн перенес эту бозе-статистику на обычный газ и пришел к идее вырождения газа. Рассмотрение колебания энергии в вырожденном газе привело его к выводу, что здесь, так же как и при излучении, протекает процесс, который одновременно имеет и дискретный, и волновой характер, как это предсказал де Бройль исходя из совершенно других соображений. Так исследование Эйнштейна глубочайшим образом связано с теми обоими направлениями идей, которые привели к современной квантовой механике.

Но когда она возникла (в 1926 году в Геттингене), Эйнштейн очень холодно ее отверг. Он писал мне в декабре 1926 года: «Квантовая механика — теория, внушающая большое уважение. Но внутренний голос говорит мне, что это еще не настоящий Иаков. Эта теория дает много, но едва ли она подвела нас ближе к тайне предков. Во всяком случае, я убежден, что никто не играет в кости».

Эти отрицательные взгляды он сохранил до конца несмотря на весь триумф квантовой механики и ее дальнейшее развитие в виде квантовой электродинамики. Вера в объективный, независимый от наблюдающего субъекта мир была основой его научного развития. При этом он имел в виду не только справедливость определенных строгих законов (которые ведь никогда не отрицала никакая естественнонаучная философия), но и требование,

согласно которому в мире в каждый момент существует совершенно определенное состояние и каждое следующее состояние должно полностью обуславливаться предшествующим. Он требовал, чтобы теоретическое описание исходило из идеи такого объективного мира, а научное исследование должно состоять во все более точном установлении действительного развития мира. Замечательно то, что с этой верой он связывал убеждение в том, что законы природы не могут логически следовать из наблюдений; они являются свободным творением исследователей или их условными соглашениями. Он верил также, что человечество обладает силой посредством объяснения явлений шаг за шагом разгадать эту тайну создания.

Квантовая механика отказывается от этой философии не из-за революционного стремления, а под давлением опыта. Идея объективности и детерминированности мира уступает место статистическому пониманию, при котором однозначное разделение субъекта и объекта больше невозможно. Я способствовал развитию физики в этом направлении, и произошло так, что однажды Эйнштейн мог мне написать: что касается наших научных взглядов, мы превратились в антиподов. Незадолго до его смерти мы переписывались по этим вопросам. Но никогда наша дружба от этого не страдала.

Хотя подавляющее большинство физиков приняли статистическую трактовку физики, хотя Нильс Бор, Паули, Гейзенберг и другие пытались в обстоятельных беседах опровергнуть возражения Эйнштейна, он упорно отстаивал взгляд, что речь может идти лишь о временном состоянии. В своем уже неоднократно упомянутом «собственноручно написанном некрологе» он говорит о скептиках, которые, подобно Оствальду и Маху, отклоняли представление об атомах: «Это — интересный пример того, как философские предубеждения мешают правильной интерпретации фактов даже ученым со смелым мышлением и с тонкой интуицией». Мне кажется, что в квантовой механике это оправдывается в отношении его самого. В последнее время я немного занимался вопросом, действительно ли классическая механика представляет собой эйнштейновский идеал детерминированности. Если принять так успешно использованный самим Эйнштейном эвристический принцип, согласно которому не следует вводить в физику утверждения о принципиально ненаблюдаемых, то можно прийти к заключению, что детерминированность и в классической механике только кажущаяся, прикрытая математически уязвимым выводом.

С 1932 года я никогда больше Эйнштейна не видел. Когда Гитлер пришел к власти, он был в Америке. Он приезжал в Европу. Бывая в

Европе, он больше не заезжал в Германию, а останавливался в Бельгии. Оттуда он послал письмо в Прусскую академию, в котором объявил о своем выходе из академии. Он знал, что его противники одержали верх и хлопочут о его исключении. Он хотел избавиться от смущения Планка и Нернста, которые приглашали его в Берлин и всегда были о нем высокого мнения.

О том, что случилось дальше в эти смутные дни, о сожжении его книг, исключении из других академий и научных обществ и т. д., я хочу умолчать.

В Америке Эйнштейн нашел новую родину. Он получил блестящее положение во вновь основанном научно-исследовательском институте (Institute for Advanced Study) в Принстоне. Там он мог спокойно жить и работать. Так как я в эти годы в Америке не был, я ничего не могу об этом рассказать по собственным впечатлениям. Его письма никогда не касались личных дел, а всегда лишь вопросов науки и познания. Даже о большом политическом событии, в которое он был вовлечен, едва упоминалось. Возвращение к доисторическому варварству, которое произошло в центре Европы, он предвидел. Гибель в средней Европе евреев, к которым он принадлежал по своему происхождению, глубоко его потрясла. Он заступался за сионистское движение, но, вероятно, не по расовым, национальным или религиозным мотивам, а из человеческих чувств, ибо не было никаких других средств защиты от преследований. По поводу проводимого в Палестине строительства он высказывал большое восхищение. Но когда ему после смерти Вайцмана была предложена должность президента нового государства, он отказался.

Трагизм его последних лет достиг высшей точки в его вмешательстве в дело атомной бомбы. Почти за 40 лет до того он вывел из теории относительности формулу $E = Mc^2$, согласно которой масса (M) эквивалентна энергии (E) и они взаимно превращаются друг в друга (c — скорость света)*, и ее значение было ясно осознано задолго до какой-либо экспериментальной проверки, не говоря уже о возможном техническом применении. Теперь эта возможность была дана, вместе с нею и опасность, что Гитлер мог получить в свои руки грозное средство разрушения для порабощения мира. Это побудило его написать известное письмо президенту Рузвельту, которое дало толчок к разработке атомной бомбы, а тем самым привело к теперешнему ужасающе странному положению, при котором человечество, хотя оно еще и не созрело для длительного мира, имеет только выбор между

* Широко распространенная, но не точная формулировка соотношения эквивалентности массы и энергии. — *Ред.*

миром и самоуничтожением. Но об этих идеях Эйнштейна я знаю не больше того, что вообще стало известно из публикаций в газетах и книгах. Позвольте мне закончить доклад несколькими строками из письма его падчерицы Марго к моей жене, в котором описывается его смерть (он умер 18 апреля 1955 года): «Знаешь ли ты, что я лежала в том же госпитале, где был и Альберт? Я получила право еще дважды его видеть в течение нескольких минут и разговаривать. Я была подвезена к нему в кресле. Сначала я его не узнала — так он изменился в лице от страданий и потери крови. Но его существо было то же. Он обрадовался тому, что я немного лучше выгляжу, шутил со мной. Он хорошо понимал свое состояние, говорил со мной с глубоким спокойствием, даже с легким юмором о врачах и ожидал своей смерти, как обычно ожидаемое «событие природы». Таким же бесстрашным, каким он был в жизни, таким же спокойным и скромным был он в своей смерти. Без всякой сентиментальности и без сожаления уходил он из этого мира».

1956 г.

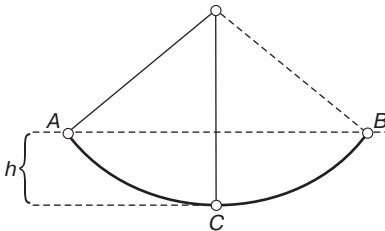
ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

РАБОТЫ ЭЙНШТЕЙНА ПО ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В ПОПУЛЯРНОМ ИЗЛОЖЕНИИ

$E = mc^2$: настоящая проблема нашего времени

Чтобы понять принцип эквивалентности массы и энергии, мы должны обратиться к двум законам сохранения (или «баланса»), игравшим независимо один от другого выдающуюся роль в дорелятивистской физике. Мы имеем в виду законы сохранения энергии и импульса. Первый из них, выдвинутый Лейбницем еще в XVII веке, рассматривался в XIX веке по существу как следствие принципов механики.



Рассмотрим, например, маятник, который качается между точками A и B . В этих точках его масса m расположена выше наиболее низкой точки траектории C на величину h (см. рисунок). С другой стороны, в точке C разность высот исчезает, но вместо этого масса приобретает скорость v . Дело об-

стоит так, как если бы разность высот могла бы целиком превращаться в скорость, и наоборот. Точное соотношение должно иметь вид $mgh = (m/2)v^2$, где g — ускорение силы земного тяготения. Интересно, что это соотношение не зависит ни от длины маятника, ни от пути, по которому движется масса.

Значение этого факта заключается в том, что в процессе колебания нечто сохраняется, и это нечто есть энергия. В точках A и B это энергия положения, или «потенциальная» энергия; в точке C это энергия движения, или «кинетическая» энергия. Если такой взгляд справедлив, то сумма $mgh + m(v^2/2)$ должна иметь одно и то же значение при любом положении маятника, если под h понимать высоту массы m над C , а под v — скорость в этой же точке траектории маятника. И эта сумма

$E = mc^2$: The most urgent Problem of our Time. Sci. Illustr., I, 1946, 16–17.

действительно сохраняется. Обобщение этого принципа приводит нас к закону сохранения механической энергии. Но что происходит, когда трение останавливает маятник?

Ответ дает изучение тепловых явлений. Анализ этих явлений, основанный на предположении, что тепло есть неуничтожаемая субстанция, перетекающая из более горячего тела в более холодное, приводит нас, казалось бы, к закону «сохранения тепла». С другой стороны, с незапамятных времен было известно, что тепло может создаваться трением, как, например, при добывании огня трением палочек у индейцев. Физики долго не могли объяснить этот способ «добывания» тепла. Их трудности были преодолены лишь тогда, когда было установлено, что на создание любого заданного количества тепла нужно затратить в точности пропорциональное количество механической энергии. Таким образом мы приходим к принципу «эквивалентности работы и тепла». В нашем маятнике, например, механическая энергия благодаря трению постепенно превращается в тепло.

Таким образом, законы сохранения механической и тепловой энергии слились в единый закон. Это привело физиков к мысли о возможности дальнейшего расширения закона сохранения энергии — применительно к химическим и электромагнитным процессам и вообще ко всем процессам. Оказалось, что в нашей физической системе именно полная сумма энергий остается постоянной независимо от характера возможных превращений.

Теперь о принципе сохранения массы. Масса определяется как противодействие тела ускорению (инертная масса). Она измеряется также весом тела (тяжелая масса). То обстоятельство, что два столь различные определения приводят к одному и тому же значению массы тела, само по себе является поразительным. Согласно принципу сохранения (а именно: масса остается неизменной при любых физических или химических превращениях), масса является существенной (ввиду своей неизменности) характеристикой материи. Нагревание, плавление, испарение, образование химических соединений не должны изменять полной массы.

Физики считали этот принцип справедливым еще несколько десятилетий тому назад. Однако он оказался несостоятельным перед лицом специальной теории относительности. Поэтому он слился с законом сохранения энергии, подобно тому, как примерно шестьюдесятью годами раньше закон сохранения механической энергии объединился с законом сохранения тепла. Мы могли бы сказать, что закон сохранения энергии, поглотив ранее закон сохранения тепла, включил теперь в себя и принцип сохранения массы и управляет всем единолично.

Эквивалентность массы и энергии принято выражать (хотя это и не совсем точно) формулой $E = mc^2$, где c — скорость света, составляющая около 186 000 миль/с, E — энергия, содержащаяся в покоящемся теле, m — его масса. Энергия, соответствующая массе m , равна этой массе, умноженной на квадрат чудовищно большой скорости света, т. е. на единицу массы приходится огромное количество энергии.

Но если каждый грамм вещества содержит столь большое количество энергии, то почему это обстоятельство так долго оставалось незамеченным? Ответ достаточно прост: до тех пор пока энергия не выходит наружу, она остается незамеченной. Дело обстоит так же, как со сказочно богатым человеком, который никогда не тратит ни цента: никто не может сказать, насколько он богат.

Мы можем теперь разрешить это соотношение относительно m и сказать, что увеличение энергии тела на величину E должно сопровождаться увеличением его массы на величину E/c^2 . Я легко могу сообщить некоторому телу энергию, нагрев, например, его на десять градусов. Так почему же никогда не замечалось увеличения массы, или увеличения веса, связанного с этим изменением? Дело в том, что в приращении массы огромный множитель c^2 входит в знаменатель дроби. Увеличение массы слишком мало, чтобы его можно было измерить непосредственно даже самыми чувствительными весами.

Чтобы увеличение массы было измеримым, изменение энергии, приходящееся на единицу массы, должно быть невероятно большим. Нам известно только одно явление, где освобождается такого порядка количество энергии в расчете на единицу массы; это — радиоактивный распад. Схематически процесс идет следующим образом: атом с массой M расщепляется на два атома с массами M' и M'' , которые разлетаются с огромной кинетической энергией. Если мы остановим эти атомы, т. е. заберем у них энергию движения, то они в совокупности будут обладать гораздо меньшей энергией, чем исходный атом. Согласно принципу эквивалентности, суммарная масса $M' + M''$ продуктов распада должна быть несколько меньше, чем первоначальная масса M распадающегося атома, что противоречит старому принципу сохранения массы. Относительная разность этих масс составляет примерно десятую долю процента.

Сейчас мы не можем реально измерять вес отдельного атома. Однако существуют косвенные методы, позволяющие точно измерить веса атомов. Мы можем также определить кинетические энергии, передаваемые продуктам распада M' и M'' . Таким образом, оказалось возможным провести проверку и подтвердить соотношение эквивалентности. Кроме того, этот принцип позволяет нам рассчитать заранее по известным с большой точностью атомным весам, какое именно

количество энергии должно выделиться при любом интересующем нас атомном распаде. Конечно, этот принцип ничего не говорит о том, когда (или каким образом) произойдет распад.

Происходящие события можно проиллюстрировать на нашем примере с богачом. Атом M — это богатый скупец, который при жизни не расстаётся с деньгами (с энергией). Но по завещанию он передает свое состояние сыновьям M' и M'' при условии, что они выделяют для общества некую малую часть, меньшую одной тысячной всего имущества (энергии или массы). Сыновья владеют вместе несколько меньшим состоянием, чем владел отец (суммарная масса $M' + M''$ немого меньше, чем масса M радиоактивного атома). Но часть, переданная обществу, хотя и относительно мала, все же настолько огромна (если рассматривать ее как кинетическую энергию), что несет с собой большую угрозу зла. Предотвращение этой угрозы стало настоящей проблемой современности.

1946 г.

Относительность: сущность теории относительности

Математика оперирует исключительно с отношениями между понятиями, не принимая во внимание их связь с опытом. Физика также имеет дело с математическими понятиями, однако эти понятия приобретают физическое содержание лишь в том случае, когда их связь с объектами опыта четко определена. Так, в частности, обстоит дело с понятиями движения, пространства, времени.

Теория относительности — это физическая теория, основанная на последовательной физической интерпретации трех указанных понятий. Название «теория относительности» связано с тем, что движение, с точки зрения возможного опыта, всегда представляется как движение одного тела относительно другого (например, автомобиля относительно дороги или Земли относительно Солнца и неподвижных звезд). Движение никогда не наблюдается как «движение по отношению к пространству», иначе говоря, как «абсолютное движение». «Принцип относительности» в наиболее широком смысле состоит в следующем утверждении: все физические явления имеют такой характер, что не дают основания вводить понятие «абсолютного движения» или, более коротко, но менее точно, «абсолютного движения не существует».

Казалось бы, мы мало что можем почерпнуть из такого рода отрицательного утверждения. Однако в действительности оно сильно ограничивает круг (мыслимых) законов природы. В этом смысле можно провести аналогию между теорией относительности и термодинамикой. Последняя также основана на отрицательном утверждении: «вечный двигатель невозможен».

Построение теории относительности включает в себя два этапа: построение «специальной теории относительности» и «общей теории

Relativity: Essence of the Theory of Relativity. Amer. People Encycl., 1949, XVI, Chicago.

относительности». Последняя предполагает справедливость первой в предельном случае и является ее последовательным обобщением.

А. Специальная теория относительности

Физическая интерпретация пространства и времени в классической механике. Геометрия, с физической точки зрения, представляет собой совокупность законов, согласно которым взаимно покоящиеся твердые тела можно располагать друг относительно друга (например, треугольник состоит из трех стержней, концы которых постоянно соприкасаются). Предполагается, что при такой интерпретации аксиомы Евклида справедливы. «Пространство» в этом понимании представляет собой бесконечное твердое тело (или решетку), к которому отнесены положения всех прочих тел (тело отсчета). Аналитическая геометрия (Декарта) использует в качестве тела отсчета, представляющего пространство, три взаимно-перпендикулярных жестких стержня, вдоль которых измеряются каким-то способом «координаты» (x, y, z) точек пространства, определяемые как ортогональные проекции (с помощью жесткого масштаба).

Одновременность. Физика имеет дело с «событиями» в пространстве и времени. Каждому событию помимо трех пространственных координат x, y, z принадлежит временная координата t . Предполагается, что последняя измеряется часами (идеальным периодическим процессом) пренебрежимо малых размеров. Эти часы C следует считать покоящимися в одной из точек системы координат, например в начале координат ($x = y = z = 0$). Тогда время события, происшедшего в точке $P(x, y, z)$, определяется как показание часов, одновременное с событием. Здесь понятие «одновременности» предполагалось имеющим физический смысл без специального определения. Это — неточность, и она кажется безобидной лишь потому, что с помощью света (скорость которого практически бесконечна с точки зрения повседневного опыта) одновременность пространственно разделенных событий, казалось бы, можно установить непосредственно.

Специальная теория относительности устраняет эту неточность, вводя физическое определение одновременности с помощью световых сигналов. Время t события P есть показание часов C в момент прибытия светового сигнала, пришедшего от события, за вычетом времени, необходимого световому сигналу для преодоления расстояния до часов. Введение такой поправки основано на предположении (постулате) о постоянстве скорости света.

Это определение сводит понятие одновременности пространственно удаленных событий к понятию одновременности событий,

происходящих в одном и том же месте (совпадение событий), а именно: к одновременности прибытия светового сигнала в S и отсчета времени часами C .

Инерциальные системы и принцип постоянства скорости света. Классическая механика основана на принципе Галилея: тело находится в состоянии равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока другие тела не воздействуют на него. Это утверждение не может быть справедливо для произвольно движущихся систем координат. Оно может претендовать на справедливость только для так называемых «инерциальных систем». Инерциальные системы движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Классическая физика претендует на справедливость своих законов лишь относительно всех инерциальных систем (специальный принцип относительности).

Теперь легко понять дилемму, которая привела к специальной теории относительности. Опыт и теория постепенно создали убеждение, что свет в пустом пространстве всегда распространяется с одной и той же скоростью и независимо от своего цвета и состояния движения источника света (принцип постоянства скорости света — в дальнейшем мы будем называть его « L -принципом»). Элементарные интуитивные соображения, казалось бы, говорят, что один и тот же луч света не может двигаться с одной и той же скоростью c по отношению ко всем системам координат. Казалось бы, L -принцип противоречит специальному принципу относительности.

Однако это противоречие оказывается лишь кажущимся и основано на заблуждении относительно абсолютного характера времени или, скорее, одновременности удаленных событий. Мы видим, что координаты события x, y, z и t можно в данный момент определить лишь по отношению к некоторой избранной системе координат (инерциальной системе). Преобразование координат события x, y, z , которое следует выполнить при переходе от одной инерциальной системы к другой, нельзя осуществить, не пользуясь определенными физическими предположениями. Однако ниже следующий постулат оказывается достаточным для решения этой проблемы: L -принцип выполняется во всех инерциальных системах (приложение специального принципа относительности к L -принципу). Определенные таким образом и линейные по x, y, z, t преобразования называются преобразованиями Лоренца. Эти преобразования формально характеризуются требованием, чтобы выражение $dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$, составленное из разностей координат dx, dy, dz, dt двух бесконечно близких событий, было инвариантом (т. е. чтобы при преобразованиях оно

переходило в то же самое выражение, образованное из разностей координат в новой системе).

С помощью преобразований Лоренца специальный принцип относительности может быть сформулирован следующим образом: законы природы инвариантны относительно преобразований Лоренца (т. е. закон природы не должен измениться, если отнести его к новой инерциальной системе при помощи преобразования Лоренца для x, y, z, t).

Основные результаты специальной теории относительности. Специальная теория относительности привела к ясным физическим представлениям о пространстве и времени и в связи с этим к выяснению того, как ведут себя движущиеся масштабы и часы. Она устранила понятие абсолютной одновременности, а так же понятие мгновенного действия на расстоянии в смысле Ньютона. Она показала, как нужно изменить уравнения движения при рассмотрении движений со скоростью, не очень малой по сравнению со скоростью света. Она разъяснила формально структуру уравнений Максвелла для электромагнитного поля; в частности, она позволила понять внутреннее единство электрического и магнитного полей. Она объединила законы сохранения импульса и энергии в единый закон и продемонстрировала эквивалентность массы и энергии. С формальной точки зрения то, что было достигнуто специальной теорией относительности, можно охарактеризовать следующим образом. Она в общем виде указала роль, которую играет мировая постоянная c (скорость света) в законах природы, и продемонстрировала существование тесной связи между тем, как в эти законы входят пространственные координаты, с одной стороны, и время — с другой.

Б. Общая теория относительности

В одном фундаментальном пункте специальная теория относительности осталась верна основам классической механики, а именно: она сохранила утверждение, что законы природы справедливы только по отношению к инерциальным системам. Круг «допустимых» (т. е. оставляющих форму законов природы неизменной) преобразований координат ограничивается исключительно (линейными) преобразованиями Лоренца. Действительно ли это ограничение основано на физических фактах? Нижеследующие соображения убедительно говорят об обратном.

Принцип эквивалентности. Тело обладает инертной массой (противодействующей ускорению) и тяжелой массой (определяющей вес тела в заданном гравитационном поле; например, на

поверхности Земли). Эти две величины, столь существенно различные по их определению, как показывает эксперимент, измеряются одним и тем же числом. Должна существовать более глубокая причина этого обстоятельства. Этот факт можно описать иначе: в гравитационном поле ускорения различных масс одинаковы. Или, наконец, можно сказать так: в гравитационном поле тела ведут себя так же, как и в его отсутствие, если в последнем случае в качестве системы отсчета используется равномерно ускоренная система координат (а не инерциальная система).

В последнем случае, по-видимому, нет оснований отказываться от следующей интерпретации. Система рассматривается как «покоящаяся» и «кажущееся» гравитационное поле в ней рассматривается как «истинное». Такое гравитационное поле, «порожденное» ускорением системы координат, было бы, очевидно, бесконечно протяженным и не могло бы создаваться гравитирующими массами, сосредоточенными в конечном объеме. Однако если нашей целью является построение теории полевого типа, это обстоятельство не может помешать нам. При такой интерпретации инерциальные системы теряют свое особое значение, и мы находим «объяснение» равенству тяжелой и инертной масс (одно и то же свойство материи проявляется либо как вес, либо как инерция, в зависимости от способа описания).

Если рассуждать формально, то, допуская системы координат, движущиеся ускоренно по отношению к исходным «инерциальным» системам, мы допускаем нелинейные преобразования координат и, следовательно, существенно расширяем идею инвариантности, т. е. принцип относительности.

Тщательный анализ с учетом результатов специальной теории относительности показывает, что при таком обобщении координаты нельзя уже интерпретировать как результаты измерений. Лишь разности координат в совокупности с полевыми величинами, описывающими гравитационное поле, определяют измеримые расстояния между событиями.

Коль скоро пришлось принять нелинейные преобразования координат как переход между двумя эквивалентными системами, то проще всего, по-видимому, требовать допустимости всех непрерывных преобразований координат (они образуют группу), т. е. считать допустимыми произвольные криволинейные системы координат, в которых поля описываются регулярными функциями (общий принцип относительности).

Гравитация в общей теории относительности. Теперь нетрудно понять, почему общий принцип относительности (на основе принципа

эквивалентности) привел к теории тяготения. Существует частный случай пространства, физическую структуру которого (поле) мы можем предполагать точно известной, основываясь на специальной теории относительности. Это случай пустого пространства, в котором нет ни электромагнитных полей, ни вещества. Оно полностью определяется своим «метрическим» свойством: пусть dx_0, dy_0, dz_0, dt_0 — разности координат двух бесконечно близких точек (событий); тогда величина

$$ds^2 = dx_0^2 + dy_0^2 + dz_0^2 - dt_0^2 \quad (1)$$

может быть измерена, и ее значение не зависит от конкретного выбора инерциальной системы. Если в этом пространстве ввести новые координаты x_1, x_2, x_3, x_4 посредством преобразования общего вида, то величина ds^2 для этой же пары точек будет иметь вид

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k \quad (2)$$

(здесь подразумевается суммирование по i и k от 1 до 4), причем $g_{ik} = g_{ki}$. Тогда величины g_{ik} , которые образуют «симметричный тензор» и являются непрерывными функциями x_1, \dots, x_4 , описывают, согласно «принципу эквивалентности», частный случай гравитационного поля [а именно: поле, которое можно вновь преобразовать к виду (1)]. Если воспользоваться работами Римана по метрическим пространствам, то свойства такого рода поля g_{ik} можно точно охарактеризовать («условием Римана»).

Однако мы ищем условия, которым удовлетворяют гравитационные поля «общего» вида. Естественно предположить, что их так же можно описать, как тензорные поля типа g_{ik} , которые, вообще говоря, не допускают преобразования линейного элемента к виду (1), т. е. удовлетворяют не условию Римана, а более слабым условиям, также не зависящим, подобно условию Римана, от выбора координат (т. е. инвариантным относительно преобразования общего вида). Простые формальные соображения приводят к более слабым условиям, которые тесно связаны с условием Римана. Эти условия и являются искомыми уравнениями для чисто гравитационного поля (в отсутствие вещества и электромагнитных полей).

Экспериментальные подтверждения общей теории относительности. Уравнения небесной механики Ньютона могут быть получены из этих уравнений как приближенные и, кроме того, можно найти малые поправки, которые описывают некоторые наблюдавшиеся на опыте эффекты (отклонение луча света гравитационным полем звезды, влияние гравитационного потенциала на частоту испущен-

ного света, медленное вращение эллиптических орбит планет — смещение перигелия Меркурия). Кроме того, эти уравнения объясняют «разбегание» галактических систем, которое проявляется в красном смещении света, испускаемого этими системами.

Общая теория относительности пока еще неполна в том смысле, что общий принцип относительности может быть применен удовлетворительным образом только к гравитационным полям, но не ко всему полю. Нам до сих пор неизвестно, какой математический аппарат следует применять для описания всего поля в пространстве и каковы те общие инвариантные законы, которым подчиняется это поле. По-видимому, можно быть уверенным в одном: общий принцип относительности окажется необходимым и эффективным оружием в решении проблемы единого поля.

1948 г.

Относительность и проблема пространства

Характерной особенностью ньютоновской физики является то, что она пространству и времени, так же как и материи, должна приписывать независимое реальное существование, поскольку в ньютоновском законе движения появляется понятие ускорения. Но ускорение в этой теории может означать только «ускорение по отношению к пространству». Таким образом, ньютоново пространство должно мыслиться как «покоящееся» или, по крайней мере, как «неускоренное», чтобы ускорение, появляющееся в законе движения, можно было рассматривать как величину, имеющую физический смысл. Почти то же самое справедливо и для времени, которое также входит в определение понятия ускорения. Сам Ньютон и наиболее критически настроенные его современники чувствовали, что это не позволяет считать физической реальностью как само пространство, так и состояние движения последнего; но в то время не было другого выбора, если хотели, чтобы механика имела ясный смысл.

Приписание физической реальности пространству вообще и, особенно, пустому пространству — в самом деле требование слишком жестокое. Философы с давних времен всегда сопротивлялись такому требованию. Декарт аргументировал это примерно так: пространство

Relativität und Raumproblem. Приложение V к немецкому изданию 1954 года книги «О специальной и общей теории относительности». (Эйнштейн говорил, что в этом приложении он изложил свои взгляды на проблему пространства вообще и на изменения наших представлений о пространстве, возникающие под влиянием релятивистской точки зрения. Ему хотелось показать, что пространству и времени нельзя с необходимостью приписать раздельное существование, независимо от действительных объектов физической реальности; что физические объекты находятся не в пространстве, но эти объекты являются пространственно протяженными; что на этом пути концепция «пустого пространства» теряет свой смысл». — *Ред.*)

совпадает с протяженностью, а протяженность связана с телами; таким образом, нет пространства без тел и, следовательно, нет пустого пространства. Слабость этой аргументации заключается главным образом в следующем. Несомненно верно, что понятие протяженности обязано своим происхождением нашему опыту в расположении твердых тел в пространстве. Отсюда, однако, нельзя заключить, что понятие протяженности не может быть оправдано и в других случаях. Такое расширение понятий может быть обосновано косвенно по его значению для интерпретации эмпирических результатов. Поэтому утверждение, что протяженность обязательно связана с телами, очевидно, само по себе необоснованно. Однако позже мы увидим, что общая теория относительности подтверждает все же концепцию Декарта, хотя и другим путем. Декарта привело к его удивительно привлекательной точке зрения сознание того, что без настоящей необходимости не следует приписывать реальность вещам, подобным пространству, которые не допускают «прямой проверки на опыте»*.

Психологическое происхождение идеи пространства или необходимости ее далеко не так очевидно, как может показаться на основе привычного нам образа мышления. Геометры прошлого имели дело с мысленными объектами (прямая, точка, поверхность), но не с пространством как таковым, которое понадобилось позже в аналитической геометрии. Однако идея пространства подсказывалась некоторыми простыми опытами. Допустим, что сделан ящик. Внутри ящика так разместим предметы, чтобы он был целиком заполнен. Возможность такого размещения предметов есть свойство материального объекта — «ящика», то, что с ним связано, — «ограниченное пространство». Это — нечто различное для разных ящиков, что можно естественно представить себе, независимо от того, имеются вообще какие-либо предметы в ящике в любой момент времени или нет. Когда в ящике нет предметов, его пространство «пустое».

До сих пор наше представление о пространстве связывалось с ящиком. Однако оказывается, что все возможные способы размещения, которые определяют пространство-ящик, не зависят от толщины стенок ящика. Нельзя ли тогда сделать эту толщину равной нулю, не теряя, однако, «пространства»? Естественность такого предельного процесса очевидна, и для нашего воображения пространство без ящика — вещь очевидная; она тем не менее становится нереальной, как только мы забываем происхождение этого понятия. Можно думать, что Декарт считал его несовместимым с представлениями о пространстве как о независимой от материальных объектов вещи, которая может

* Это выражение не следует понимать слишком буквально.

существовать в отсутствие материи*. (В то же самое время, это не мешало ему трактовать пространство как фундаментальное понятие его аналитической геометрии.) Ссылка на вакуум в ртутном барометре, конечно, обезоружила картезианцев. Но нельзя отрицать, что уже на этой примитивной стадии пространство понималось как самостоятельно существующий реальный объект.

Способы, которыми тела могут заполнять пространство (например, ящик), представляют собой предмет трехмерной евклидовой геометрии; ее аксиоматическая структура, однако, легко вводит в заблуждение, так как она не подчеркивает, что геометрия не описывает реальные объекты.

Если теперь понятие пространства формируется намеченным выше образом и следует из опыта «заполнения» ящика, то это пространство прежде всего — *ограниченное пространство*. Однако это ограничение не представляется существенным, так как, очевидно, всегда можно ввести в рассмотрение ящик *б*льших размеров, охватывающий ящик меньших размеров. На этом пути пространство представляется как нечто неограниченное.

Я не буду здесь рассматривать, как понятия трехмерности и «евклидовости» пространства могут быть прослежены в сравнительно простых опытах. Прежде всего я буду рассматривать с других точек зрения роль понятия пространства в развитии физической мысли.

Если некоторый ящик *s* находится в состоянии относительного покоя, внутри некоторого ящика *S* *б*льших размеров, то полость ящика *s* является частью полого пространства ящика *S*; при этом одно и то же «пространство», которое содержат оба ящика, принадлежит каждому из них. Однако, если *s* движется относительно *S*, это понятие становится менее простым. Тогда были склонны думать, что ящик *s* охватывает всегда одно и то же пространство, но различные части пространства ящика *S*. В таком случае становилось необходимым выделить для каждого ящика его особое пространство, которое не мыслится ограниченным, и предположить, что эти два пространства находятся в движении по отношению друг к другу.

Прежде чем такой сложный вопрос был осознан, пространство представлялось неограниченной средой, или вместилищем, в котором плавают материальные объекты. Теперь же надо вспомнить, что существует бесконечное число пространств, которые движутся относительно друг друга. Понятие пространства как чего-то, существующего объективно и

* Попытку же Канта устранить это затруднение путем отрицания объективности пространства трудно считать серьезной. Возможность заполнения внутреннего пространства ящика так же объективна, как и сам ящик и как объект, который может быть помещен внутри него.

независимо от вещей, относится к донаучному мировоззрению; оно сменяется идеей о существовании бесконечного числа пространств, движущихся относительно друг друга. Эта последняя оказывается логически неизбежной, но и она не может играть значительную роль в научной мысли.

Что можно сказать о психологической природе понятия времени? Это понятие, несомненно, связано с фактом «запоминания», а также с дифференциацией чувственных ощущений и воспоминанием о них. Сомнительно, дает ли нам что-либо психологически дифференциация чувственного опыта и воспоминание (или просто изображение). Всякий знает по своему опыту, что он часто сомневался в том, испытывал ли он что-то действительно или просто вообразил себе это. Вероятно, способность различать между этими возможностями впервые приходит как результат упорядочивающей деятельности мышления. «Запоминание» упорядочивает ощущения и позволяет рассматривать «более ранние переживания» в сравнении с «переживаниями в настоящее время». Этот понятный принцип упорядочения воспоминаемого опыта и возможность его выполнения имели своим результатом субъективное понятие времени, т. е. такое понятие времени, которое относится к упорядочению переживаний индивидуума.

Что мы имеем в виду, вводя объективное понятие времени?

Рассмотрим следующий пример. Лицо *A* («я») испытало: «Молния!» В то же самое время лицо *A* также обнаружило такое поведение лица *B*, что сопоставило поведение лица *B* со своим собственным ощущением молнии. Таким образом, *A* связывает с *B* свое ощущение молнии. У лица *A* возникает представление, что другие лица также участвуют в опыте с молнией. «Молния!» теперь истолковывается уже не как некоторое исключительно субъективное переживание, но как опыт других лиц (или, в конечном счете, только как «потенциальный опыт»). Таким образом, ощущение «Молния!», которое первоначально доходило до сознания как некоторый «опыт», теперь интерпретируется как некоторое (объективное) «событие». Это как раз и есть полная сумма всех событий, которую мы имеем в виду, когда говорим о «реальном внешнем мире».

Мы видели, что мы сами склонны приписывать упорядочение во времени наших переживаний следующим образом. Если β позже, чем α , и γ позже, чем β , то γ также позже, чем α («последовательность событий»). Как обстоит теперь дело в этом отношении с «событиями», которые мы ассоциируем с переживаниями? На первый взгляд представляется естественным предположить, что существует порядок следования событий во времени, который согласуется с временным порядком переживаний (ощущений). Вообще это делалось бессознательно до тех пор, пока

не стали возникать сомнения*. Чтобы прийти к идее объективного мира, необходимы еще дополнительные конструктивные понятия: событие локализовано не только во времени, но и в пространстве.

В предыдущих разделах мы пытались описать, как понятия пространства, времени и события психологически могут быть связаны с переживаниями. С логической точки зрения они представляют собой свободные творения человеческого разума, инструменты мышления, которые должны служить для установления связи одних ощущений с другими, так чтобы их можно было лучше обозревать. Попытка осознать эмпирические источники этих фундаментальных понятий должна показать, в какой мере мы фактически привязаны к этим понятиям. Мы отдаем себе отчет в свободе, разумное использование которой в случае необходимости всегда является трудным делом.

Мы должны еще добавить нечто существенное к этому наброску, касающемуся психологической природы понятий пространства — времени — события (будем называть их более кратко понятиями «пространственного типа» в отличие от этих понятий в психологической сфере). Мы связывали понятие пространства с ощущениями, используя ящики и размещение материальных объектов в них. Таким образом, это формирование понятий уже предполагает понятие материальных объектов (например, «ящиков»). Таким же образом лица, которые были введены в рассмотрение при обсуждении объективного понятия времени, тоже играют роль материальных объектов. Поэтому мне кажется, что формирование понятия материального объекта должно предшествовать нашим понятиям времени и пространства.

Все эти понятия пространственного типа вместе с такими, как «боль», «цель», «намерение» и другими понятиями из области психологии, принадлежат к донаучным представлениям. Теперь для физического мышления, как и для естественнонаучного мышления вообще, характерно то, что оно в принципе стремится обойтись *только* понятиями «пространственного типа» и старается выразить с помощью их все соотношения, имеющие форму законов. Физик пытается свести цвета и тона к частотам колебаний, психолог — мышление и боль к нервным процессам, так что психический элемент как таковой исключается из причинной зависимости в природе и, таким образом, нигде не выступает как независимое звено в причинных связях. Эта позиция, с точки зрения которой для понимания всех связей возможно в принципе использовать исключительно понятия «простра-

* Например, порядок ощущений во времени, полученных акустическими средствами, может отличаться от временного порядка ощущений, полученных визуально, так что временная последовательность событий не может быть отождествлена с временной последовательностью ощущений.

нственного типа», несомненно, и есть то, что в настоящее время понимается под термином «материализм» (после того, как «материя» утратила свою роль фундаментального понятия).

Зачем понадобилось ниспровергать с платоновских олимпийских высот фундаментальные представления естественнонаучной мысли и пытаться обнаружить их земное происхождение? Ответ: для того чтобы освободить эти идеи от привязанного к ним «табу» и таким образом достичь большей свободы в формировании представлений и понятий. В том, что эта критическая концепция была введена, бессмертная заслуга принадлежит прежде всего Д. Юму и Э. Маху.

Наука приняла от донаучного мышления понятия пространства, времени и материального объекта (с важным частным случаем «твердого тела»), а затем модифицировала и уточнила их. Ее первым значительным достижением было построение евклидовой геометрии. Аксиоматическая формулировка последней не должна была заставлять нас закрывать глаза на ее эмпирическое происхождение (возможности размещения твердых тел), в особенности на трехмерную природу пространства, а также на его евклидовский характер (т. е. возможность заполнить без пробелов пространство одинаковыми «кубами»).

Тонкость понятия пространства возросла с открытием того, что абсолютно твердых тел не существует. Все тела являются упруго деформируемыми и изменяют свой объем с изменением температуры. Поэтому структуры, возможные расположения которых должны описываться евклидовой геометрией, не могут быть оторваны от физических понятий. Но так как физика при установлении своих понятий в конце концов должна использовать геометрию, то эмпирическое содержание геометрии может быть сформулировано и проверено на опыте только в рамках всей физики.

В этой связи необходимо также подумать об атомистике и ее концепции конечной делимости; пространство не может быть измерено до субатомных размеров. Атомистика заставляет также отказаться в принципе от резкой и статически определенной ограничивающей поверхности твердых тел. Строго говоря, не существует *точных* законов для возможных расположений твердых тел, касающихся друг друга, даже в макроскопической области.

Несмотря на это, никто не думал отказываться от понятия пространства, ибо оно представляется необходимым в замечательно оправдывающейся совокупности естественных наук. Мах в девятнадцатом столетии был единственным, кто серьезно думал об исключении понятия пространства, которое он пытался заменить представлением о всей

сумме расстояний между всеми материальными точками. (Он предпринял эту попытку для того, чтобы прийти к удовлетворительному пониманию инерции).

Поле

В механике Ньютона пространство и время играют двойственную роль. Прежде всего они выполняют для объектов, встречающихся в физике, роль носителя или рамы, относительно которой события описываются с помощью пространственных координат и времени. В принципе вещество мыслится состоящим из «материальных точек», движения которых образуют физическое событие. Если вещество мыслится непрерывным, то это делается лишь в тех случаях, когда не желают или не могут описывать его дискретную структуру. В этом случае малые части (элементы объема) материи трактуются подобно материальным точкам, по крайней мере до тех пор, пока мы интересуемся только движениями, но не явлениями, которые в данный момент нельзя или ненужно относить к движениям (например, изменения температуры, химические процессы). Вторая роль пространства и времени была та, что они служили «инерциальной системой». Из всех мыслимых систем отсчета инерциальные системы потому считались привилегированными, что по отношению к ним справедлив закон инерции.

При этом существенным обстоятельством является то, что «физическая реальность», существующая независимо от познающих ее субъектов, представлялась состоящей, по крайней мере в принципе, из пространства и времени, с одной стороны, и из постоянно существующих материальных точек, движущихся по отношению к пространству и времени, — с другой. Идея независимого существования пространства и времени может быть выражена следующим образом: если бы материя исчезла, то остались бы только пространство и время (своего рода сцена, на которой разыгрываются физические явления).

Эта точка зрения была преодолена в результате возникновения новых идей, которые сначала, казалось, не вносили никаких изменений в проблему пространства—времени, а именно: в результате появления *понятия поля* и возникновения требования заменить им в принципе понятие частицы. В рамках классической физики понятие поля появлялось как вспомогательное понятие в тех случаях, когда вещество трактовалось как некоторый континуум. Например, при рассмотрении теплопроводности в твердом теле состояние этого тела описывалось путем задания температуры в каждой точке тела для каждого определенного момента времени. Математически это означает, что температура T представляется как функция пространственных коор-

динат и времени t (поле температуры). Закон теплопроводности представляется как некоторое локальное соотношение (дифференциальное уравнение), которое охватывает все частные случаи передачи тепла. Температура здесь представляет собой простой пример понятия поля. Это — некоторая величина (или некоторый комплекс величин), являющаяся функцией координат и времени. Другим примером может служить описание движения жидкости. В каждой точке и для любого момента времени существует скорость, которая количественно описывается ее тремя «компонентами» по осям системы координат (вектор). Здесь компоненты скорости в точке (поле компонент) также являются функциями координат (x, y, z) и времени (t) .

Характерной особенностью упомянутых здесь полей является то, что они выступают только в пределах весомых масс; они служат только для описания состояния вещества. На ранней стадии развития понятия поля считалось, что там, где нет вещества, не может существовать и поля. Однако в первой четверти девятнадцатого столетия было показано, что явления интерференции и распространения света могут быть объяснены с изумительной ясностью, если свет рассматривать как волновое поле, совершенно аналогичное полю механических колебаний в некотором упругом твердом теле. Таким образом, возникла необходимость ввести поле, которое могло бы существовать в пустом пространстве, в отсутствие весомой материи.

Это состояние проблемы привело к парадоксальной ситуации, так как по самой своей природе понятие поля возникло для описания состояний внутри весомых тел. Это казалось естественным, так как утвердилось убеждение, что каждое поле должно рассматриваться как некоторое состояние, допускающее механическую интерпретацию, что, конечно, предполагает присутствие вещества. Таким образом, вынуждены были предположить существование всюду, даже в пространстве, которое прежде считалось пустым, некоторого рода материи, которая была названа «эфиром».

Эмансипация понятия поля от предположения о его связи с механическим носителем нашла отражение в психологически наиболее интересных процессах развития физической мысли. В течение второй половины девятнадцатого столетия, в связи с исследованиями Фарадея и Максвелла, становилось все более ясным, что полевое описание электромагнитных процессов значительно превосходит трактовку на основе механических концепций материальной точки. Введя понятие поля в электродинамику, Максвелл успешно предсказал существование электромагнитных волн, принципиальное тождество которых со световыми волнами, уже ввиду равенства их скорости распространения, не вызывало сомнений. В результате этого оптика в принципе

была поглощена электродинамикой. Один психологический эффект этого огромного успеха состоял в том, что концепция поля, в противоположность механической картине классической физики, постепенно приобретала все большую самостоятельность. Тем не менее сначала допускали, что электромагнитные поля должны интерпретироваться как состояния эфира, и усердно пытались объяснить эти состояния как механические. Но поскольку все усилия оказывались тщетными, в науке постепенно стали привыкать к идее отказа от такой механической интерпретации. Несмотря на это все еще оставалось убеждение, что электромагнитные поля должны представлять собой состояния эфира; это продолжалось вплоть до начала двадцатого столетия.

Эфирная теория повлекла за собой следующий вопрос: как ведет себя эфир с механической точки зрения по отношению к весомым телам? Принимает ли он участие в движении этих тел или его части остаются в покое относительно друг друга? Для решения этого вопроса было предпринято много остроумных экспериментов. В этой связи должны быть отмечены следующие важные факты: «абerrация» неподвижных звезд вследствие годичного движения Земли и «эффект Допплера» (влияние относительного движения звезд на частоту излучаемого ими света, достигающего нас). Результаты всех этих наблюдений и опытов (за исключением одного, эксперимента Майкельсона—Морли) были объяснены Г.А. Лоренцом на основе предположения, что эфир не принимает участия в движениях весомых тел и что части эфира вообще не перемещаются относительно друг друга. Таким образом, эфир выступил как бы воплощением абсолютно покоящегося пространства. Но Лоренц достиг гораздо большего. Он объяснил все известные в то время электромагнитные и оптические процессы в весомых телах на основе предположения, что влияние весомой материи на электрическое поле и обратно обусловлено исключительно тем фактом, что составляющие материю частицы несут электрические заряды, которые участвуют в движении частиц. Что же касается эксперимента Майкельсона—Морли, то Г.А. Лоренц показал, что полученный результат по крайней мере не противоречит теории покоящегося эфира.

Несмотря на все эти замечательные успехи, состояние теории все еще не было полностью удовлетворительным по следующим причинам. Согласно классической механике, в справедливости которой, с высокой степенью точности, можно было бы не сомневаться, все инерциальные системы или инерциальные «пространства» эквивалентны для формулировки законов природы, т. е. законы природы инвариантны относительно перехода от одной инерциальной системы к другой. Электромагнитные и оптические *эксперименты* с высокой

точностью говорили о том же. Но из основ электромагнитной *теории* следовало, что должно отдаваться предпочтение некоторой особой инерциальной системе отсчета, а именно системе, покоящейся относительно светового эфира. Такое понимание теоретических основ совершенно неудовлетворительно. Возник вопрос: нет ли модификаций этих основ, которые бы сохраняли, подобно классической механике, эквивалентность инерциальных систем (специальный принцип относительности)?

Ответом на этот вопрос явилась специальная теория относительности. Она приняла от теории Максвелла—Лоренца предположение о постоянстве скорости света в пустом пространстве. Чтобы согласовать это предположение с эквивалентностью инерциальных систем (специальный принцип относительности), необходимо было отказаться от идеи абсолютного характера одновременности; кроме того, для перехода от одной инерциальной системы к другой служили преобразования Лоренца для времени и пространственных координат. Все содержание специальной теории относительности заключено в постулате: законы природы инвариантны относительно преобразований Лоренца. Важное значение этого требования состоит в том, что оно определенным образом ограничивает возможные законы природы.

Каково отношение специальной теории относительности к проблеме пространства? В первую очередь мы должны предостеречь от того мнения, что четырехмерность реальности была введена впервые этой теорией. Даже в классической механике «положение» события определяется четырьмя числами: тремя пространственными координатами и одной временной координатой; таким образом, вся совокупность физических «событий» мыслится как бы погруженной в четырехмерное непрерывное многообразие (континуум). Но сообразно с классической механикой, этот четырехмерный континуум распадается объективно на одномерное временное и на трехмерное пространственное сечения, причем лишь последнее из них содержит одновременные события. Это «расщепление» является одним и тем же для всех инерциальных систем. Одновременность двух определенных событий по отношению к одной инерциальной системе влечет за собой одновременность этих событий по отношению ко всем инерциальным системам. Это есть то, что имеют в виду, когда говорят об абсолютном времени в классической механике. Согласно же специальной теории относительности это уже не так. Хотя по отношению к некоторой определенной инерциальной системе существует совокупность событий, одновременных с каким-либо наблюдаемым событием, эта совокупность уже не будет независимой от выбора инерциальной системы.

Четырехмерный континуум не распадается объективно на сечения, среди которых были бы сечения, содержащие все одновременные события; для пространственно протяженного мира понятие «сейчас» теряет свой объективный смысл. В связи с этим пространство и время должны рассматриваться как объективно не распадающийся четырехмерный континуум, если желают выразить содержание объективных отношений без ненужного произвола.

Тем, что специальная теория относительности показала физическую эквивалентность всех инерциальных систем, она доказала несостоятельность гипотезы покоящегося эфира. Поэтому необходимо было отказаться от идеи, что электромагнитное поле должно рассматриваться как состояние некоторого материального носителя. Таким образом, поле становится несводимым элементом физического описания, несводимым в том же смысле, что и понятие материи в теории Ньютона.

До сих пор мы обсуждали вопрос о том, в какой мере понятия пространства и времени были *модифицированы* специальной теорией относительности. Теперь же сконцентрируем наше внимание на тех элементах, которые эта теория приняла от классической механики. В ней законы природы претендуют на справедливость только в том случае, когда в качестве основы пространственно-временного описания принята инерциальная система. Закон инерции и принцип постоянства скорости света справедливы только по отношению к *инерциальной системе*. Можно также требовать, чтобы законы поля имели физический смысл и были справедливы только по отношению к инерциальным системам. Таким образом, как и в классической механике, пространство здесь является независимой составной частью в представлении физической реальности. Если мы представим себе, что материя и поле удалены, то остается (инерциальное) пространство, или, точнее говоря, это пространство вместе со связанным с ним временем. Эта четырехмерная структура (пространство Минковского) мыслится как носитель материи и поля. Инерциальные пространства, вместе со связанными с ними временами, являются привилегированными четырехмерными координатными системами, связанными линейными преобразованиями Лоренца. Так как в этой четырехмерной структуре не существует каких-либо сечений, которые объективно представляли бы «сейчас», понятия события и становления не исключаются полностью, но усложняются. Поэтому представляется более естественным мыслить физическую реальность как четырехмерные события вместо *развития* событий трехмерных.

Это жесткое четырехмерное пространство специальной теории относительности есть до некоторой степени аналог неподвижного трехмерного эфира Г.А. Лоренца. Для этой теории справедливо также

следующее утверждение: описание физических состояний постулирует пространство как заданное с самого начала и существующее независимо. Таким образом, даже эта теория не рассеяла беспокойства Декарта, связанного с независимым или, быть может, *априорно* существующим «пустым пространством». Действительная цель нашего обсуждения — показать, до какой степени эти сомнения преодолены общей теорией относительности.

Понятие пространства в общей теории относительности

Эта теория возникла первоначально из попытки понять равенство инертной и тяжелой масс. Мы исходим из инерциальной системы S_1 , пространство которой, с физической точки зрения, является пустым. Иными словами, в рассматриваемой части пространства не существуют ни материя (в обычном смысле), ни поле (в смысле специальной теории относительности). Пусть по отношению к системе S_1 равноускоренно движется вторая система отсчета S_2 . Тогда система S_2 будет неинерциальной. По отношению к S_2 каждая пробная масса должна двигаться с ускорением, которое не зависит от ее физической и химической природы. Поэтому относительно S_2 существует картина, которую, по крайней мере в первом приближении, нельзя отличить от гравитационного поля. Таким образом, с наблюдаемыми фактами совместима следующая концепция: система S_2 эквивалентна некоторой «инерциальной системе», в отличие от S_1 , находящейся в (однородном) гравитационном поле (природой которого в этой связи не следует заниматься). Итак, когда в теорию введено гравитационное поле, инерциальная система теряет свое объективное значение, если предположить, что такой «принцип эквивалентности» может быть распространен на любое относительное движение любой системы отсчета. Если на основе этой фундаментальной идеи можно создать последовательную теорию, то само собой должен удовлетворяться надежно установленный эмпирический факт равенства инертной и тяжелой масс.

Нелинейные преобразования четырех координат, рассматриваемые в четырехмерном пространстве, соответствуют переходу от S_1 к S_2 . Теперь возникает вопрос: какого рода нелинейные преобразования допустимы или как должно быть обобщено преобразование Лоренца? Для ответа на этот вопрос решающее значение имеет следующее рассуждение.

Инерциальной системе прежней теории мы приписываем такое свойство: разности координат измеряются покоящимися «твердыми» измерительными стержнями, а разности значений времени — покоящимися часами. Первое предположение дополняется другим предположением, а именно: что для относительного расположения измерительных

стержней в покое выполняются теоремы евклидовой геометрии о «расстояниях». Тогда из результатов специальной теории относительности путем элементарных рассуждений приходим к заключению, что оказывается утраченной прямая физическая интерпретация координат для системы отсчета (S_2), ускоренной относительно инерциальной системы (S_1). Но если это так, то координаты выражают только порядок или степень «близости», а следовательно, и размерность пространства, но не выражают никаких его метрических свойств. Мы пришли, таким образом, к распространению преобразований на произвольные непрерывные преобразования*. Это включает в себе общий принцип относительности: законы природы должны быть ковариантны относительно произвольных непрерывных преобразований координат. Это требование (в сочетании с требованием наибольшей возможной логической простоты этих законов) ограничивает рассматривавшиеся законы природы несравнимо сильнее, чем специальный принцип относительности.

Такой ход мыслей существенно основан на понятии поля как независимом понятии. Так как условия, существующие по отношению к S_2 , интерпретируются как гравитационное поле, несомненно наличие масс, которые создают это поле. На основании этого хода мыслей можно также понять, почему законы чисто гравитационного поля более непосредственно связаны с идеей общей относительности, чем законы полей более общего вида (например, электромагнитного поля). Именно: мы имеем хорошую основу для предположения, что «свободное от поля» пространство Минковского представляет собой возможный частный случай и даже простейший мыслимый частный случай. Что касается метрических свойств такого пространства, то оно характеризуется тем, что $dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$ есть квадрат измеренного единичным масштабom пространственного расстояния между двумя бесконечно близкими точками трехмерного сечения «пространственного типа» (теорема Пифагора), тогда как dx_4^2 есть измеренный совместно с (x_1, x_2, x_3) соответствующим временным масштабom интервал времени между двумя событиями. Как нетрудно показать с помощью преобразований Лоренца, все это просто означает, что объективный метрический смысл придается величине

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2. \quad (1)$$

Математически это означает, что величина ds^2 инвариантна по отношению к преобразованиям Лоренца.

Если теперь, в смысле общего принципа относительности, пространство [ср. формулу (1)] подвергается произвольному непрерыв-

* Эта не вполне точная формулировка, вероятно, достаточна здесь.

ному преобразованию координат, то величина ds , имеющая объективный смысл, выражается в новой системе координат соотношением

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k, \quad (1a)$$

где должно быть выполнено суммирование по индексам i и k для всех комбинаций 11, 12, ..., 44. Компоненты g_{ik} теперь уже не константы, а функции координат, которые определены произвольно выбранным преобразованием. Тем не менее, компоненты g_{ik} являются не произвольными функциями новых координат, но функциями такого рода, что форма (1a) может быть преобразована снова в форму (1) непрерывным преобразованием четырех координат. Чтобы это было возможно, функции g_{ik} должны удовлетворять определенным общековариантным соотношениям, которые были выведены Риманом более чем за полстолетия до формулирования общей теории относительности («условие Римана»). Согласно принципу эквивалентности соотношение (1a) описывает в общековариантной форме гравитационное поле специального вида, если функции g_{ik} удовлетворяют условию Римана.

Отсюда следует, что уравнения чисто гравитационного поля общего вида должны быть удовлетворены, если выполняется условие Римана; но они должны быть слабее, чем условия Римана. Таким путем закон чисто гравитационного поля практически полностью определяется; мы не будем здесь обосновывать этого более детально.

Мы в состоянии теперь видеть, насколько переход к общей теории относительности видоизменяет понятие пространства. В соответствии с классической механикой и согласно специальной теории относительности, пространство (пространство—время) существует независимо от материи или поля. Для описания того, что заполняет пространство и зависит от координат, нужно, чтобы пространство—время, или инерциальная система с ее метрическими свойствами, мыслились существующими с самого начала, так как иначе описание «того, что заполняет пространство», не имело бы смысла*. С другой стороны, согласно общей теории относительности, не существует отдельно пространство как нечто противоположное «тому, что заполняет пространство» и что зависит от координат. Таким образом, чисто гравитационное поле может быть описано с помощью g_{ik} (как функций координат) путем решения уравнений гравитации. Если мы представим себе, что гравитационное поле, т. е.

* Если мы представим себе, что «то, что заполняет пространство» (например, поле), удалено, то все еще оставалось бы метрическое пространство, соответствующее форме (1), которое определяло бы также инерциальное поведение помещенного в него пробного тела.

функции g_{ik} , устранено, то не останется не только пространства типа (1), но и вообще *ничего*, в том числе и «топологического пространства». В самом деле, функции g_{ik} описывают не только поле, но и в то же самое время топологические и метрические структурные свойства многообразия. Пространство типа (1) с точки зрения общей теории относительности не есть пространство без поля, но представляет собой частный случай поля g_{ik} , когда — в определенной системе координат, которая сама по себе не имеет объективного значения, — функции g_{ik} имеют значения, не зависящие от координат. Пустое пространство, т. е. пространство без поля, не существует. Пространство—время существует не само по себе, но только как структурное свойство поля.

Таким образом, Декарт был не так далек от истины, когда полагал, что существование пустого пространства должно быть исключено. Эта точка зрения действительно казалась абсурдной до тех пор, пока физическую реальность видели исключительно в весомах телах. Потребовалась идея поля как реального объекта в комбинации с общим принципом относительности, чтобы показать истинную сущность идеи Декарта: не существует пространство, «свободное от поля».

Обобщенная теория гравитации

На основе общей теории относительности можно построить теорию чисто гравитационного поля, поскольку мы можем быть уверены в том, что «свободное от поля» пространство Минковского с его метрикой, соответствующей форме (1), удовлетворяет общим законам поля. Из этого частного случая закон тяготения следует в результате обобщения, которое практически свободно от произвола. Дальнейшее развитие теории определяется общим принципом относительности не столь однозначно; в течение последних десятилетий были предприняты попытки в различных направлениях. Общим для всех этих попыток было представление физической реальности как некоторого поля, которое является обобщением гравитационного поля и полевые законы которого являются обобщением закона чисто гравитационного поля. После долгих поисков (в которых приходилось идти ощупью) я думаю, что теперь нашел* наиболее естественную форму этого обобщения, но еще не в состоянии выяснить, может ли этот обобщенный закон выдержать сравнение с опытными фактами.

* Это обобщение можно охарактеризовать следующим образом. В соответствии с их происхождением из пустого «пространства» Минковского, функции g_{ik} чисто гравитационного поля обладают свойством симметрии: $g_{ik} = g_{ki}$ ($g_{12} = g_{21}$ и т. д.). Обобщенное поле есть поле того же рода, но не обладающее этим свойством симметрии. Вывод закона поля полностью аналогичен выводу его в частном случае чистой гравитации.

Для общей теории вопрос о законах этого особого поля является вторичным. Главный вопрос в настоящее время заключается в следующем: может ли теория поля рассмотренного здесь вида вообще привести нас к цели? Такая теория должна описать исчерпывающим образом физическую реальность как поле. Современное поколение физиков склонно ответить на этот вопрос отрицательно. Соглашаясь с современной формой квантовой теории, они считают, что состояние системы не может быть охарактеризовано непосредственно, но только косвенно, путем установления статистического распределения результатов измерений над системой. Преобладает убеждение, что надежно установленный экспериментально дуализм природы (корпускулярные и волновые свойства) может быть понят только на пути такого «ослабления» понятия реальности. Я думаю, что такая далеко идущая теоретическая уступка пока еще не оправдывается нашими фактическими знаниями и что не следует отказываться идти до конца по пути релятивистской теории поля.

1952 г.

Приложение 2
ИЗ РЕДКО ПУБЛИКУЕМЫХ
РАБОТ ЭЙНШТЕЙНА

Теоретическая атомистика

Сравнение, разъясняющее отношение закона сохранения энергии к опыту

Толчок развитию современного учения о теплоте вообще, так же как и молекулярно-кинетической теории тепла, дало, в первую очередь, открытие закона сохранения энергии. Вначале мы остановимся на отношении этого закона к физическому опыту. Чтобы нам не мешали ни многогранность предмета, ни привычки и убеждения, мы проведем рассмотрение с помощью совсем простого сравнения.

Передо мной стоят два открытых сверху частично заполненных водой сосуда G_1 и G_2 . Сосуды сообщаются друг с другом через гибкий шланг, по которому вода из нижних слоев одного сосуда может перетекать в другой сосуд; такое перетекание всегда происходит до тех пор, пока уровни воды в обоих сосудах не сравняются. Сосуд G_1 имеет прозрачные стенки, так что уровень воды в нем можно определять путем наблюдения снаружи; пусть этот сосуд будет закреплен на определенной высоте. Стенки же второго сосуда пусть будут непрозрачными, и непосредственно наблюдать уровень воды в этом сосуде нельзя вообще; но пусть этот сосуд установлен вертикально, и существует способ определять для каждой высоты уровня вес второго сосуда вместе с его содержимым. После установления равновесия наблюдатель при каждом положении G_2 определяет как уровень h в G_1 по отношению к стенкам этого сосуда, так и соответствующий вес g сосуда G_2 , причем он ограничивается такими положениями G_2 , когда и в G_1 , и в G_2 находится вода. Если сосуд G_1 имеет цилиндрическую форму, этот наблюдатель найдет простое соотношение, которое гласит, что — при соответствующем выборе числового множителя a — величина $ah + g$ не

Theoretische Atomistik. В кн.: «Die Physik». Unter Redaktion von E. Lecher. Die Kultur der Gegenwart. Т. 3, Abt. 3, Bd. 1, Leipzig, Teubner, 1915, 251–263.

зависит от высоты, на которой устанавливается G_2 . Если наблюдатель знаком с законами гидростатики и знает, что в сосудах находится жидкость, то такие опыты не представляют для него никакого интереса. Но наш наблюдатель ничего не знает о содержимом сосудов; для него полученный им при изучении нашей физической системы результат явится научным открытием. Он скажет: «Уровень воды h в сосуде G_1 и вес g сосуда G_2 — это эквивалентные величины, так как всякое изменение уровня воды h в G_1 всегда имеет следствием вполне определенное противоположное изменение g ; величина $ah + g$ измеряет некоторое свойственное системе неизменное количество».

Многочисленные наблюдения подобного рода и привели физиков к закону сохранения энергии. В области чистой механики (без трения) прежде всего было найдено, что существует величина Φ (потенциальная энергия), которая зависит только от положения материальных точек, и величина L («кинетическая энергия»), которая зависит только от скоростей точек; эти две величины таковы, что сумма $\Phi + L$ не изменяется во времени при всех движениях, при которых механическая система не испытывает внешних воздействий. Эту сумму принято называть «механической энергией» системы.

Содержание закона сохранения энергии

Этот закон сохранения перестает быть справедливым, если в замкнутой механической системе заметную роль играет трение. Но к середине XIX века физики поняли, что и в этом случае можно сформулировать закон сохранения, рассматривая наряду с механическими величинами еще и тепловые (эквивалентность механической и тепловой энергии). Закон сохранения будет справедливым и в случае, когда система претерпевает не только механические и тепловые, но и любые другие (например, электрические или химические) изменения состояния; в этом случае неизменная в изолированной системе величина, называемая «энергией», будет зависеть также и от переменных, определяющих состояние системы в тепловом, электрическом, химическом и других отношениях.

Влияние закона сохранения энергии на основные теоретические представления прошлого столетия

Обрисованный выше закон сохранения энергии имеет неоценимое значение для физики не только потому, что он дает нам много отдельных закономерностей и позволяет рассматривать самые разнообразные изменения с единой точки зрения, сравнивая все состояния системы по их значениям энергии. Сверх того, закон сохранения энергии заставляет нас также приписывать всякой энергии одну и ту

же физическую природу, совершенно независимо от того, в какой взаимосвязи энергия находится с непосредственно наблюдаемыми величинами в каждом отдельном случае.

Упомянутый выше несведущий наблюдатель, экспериментирующий с двумя сосудами G_1 и G_2 , может поступать в малом так же, как и физики в своей области исследования. Исходя из того, что величина $ah + g$ остается постоянной, он сначала припишет сосуду G_1 некоторое количество ah , сосуду G_2 — некоторое количество g , не предполагая, однако, что эти количества обладают одинаковым качеством; он удовлетворит опыту, представляя себе, что при данном процессе часть содержимого сосуда G_1 превращается в соответственно равное приращение содержимого G_2 . Но он может пойти и дальше, высказав гипотезу, что содержимое сосудов G_1 и G_2 одинакового качества и что, следовательно, процесс, происходящий при опускании G_2 , заключается не в *превращении*, а всего лишь в *изменении пространственного положения* содержимого сосудов. Ясно, что при таком понимании он придет к дальнейшим выводам и опытам, к которым первоначальное понимание его не привело бы.

То же самое происходило, по существу, с физиками. Опыт настойчиво подсказывал им, что закон сохранения энергии следует интерпретировать так, что, в сущности, имеется только один вид энергии, как бы ни различались внешние формы ее проявления. Такая трактовка позволяет действительно понять закон сохранения энергии, т. е. получить его как следствие общих основ теории, что представляется невозможным при допущении принципиально различных видов энергии.

Современные физики также считают выдающимся достижением сведение всех видов энергии к одному единственному виду; однако они не надеются достичь этой цели в обозримом будущем. Но в середине прошлого столетия физики были более уверенными. Механика играла столь главенствующую роль в предшествующем развитии физики, что предположение о единстве энергии для тогдашних физиков было неразрывно связано с гипотезой, что эта единая энергия должна быть механической энергией. Поэтому они были твердо убеждены в том, что в конечном счете все явления должны сводиться к механическим процессам. Во введении к своей основополагающей работе «О сохранении силы» (1847) Г. Гельмгольц выразил это убеждение следующими словами: «Наконец-то определилась задача физических наук — свести явления природы к неизменным силам притяжения и отталкивания, интенсивность которых зависит от расстояния. Разрешимость этой задачи является также условием полной познаваемости природы».

Сегодня мы, пожалуй, можем с уверенностью сказать, что это убеждение, которое несколько десятилетий назад было еще, безусловно, господствующим, уже нельзя сохранить в полном объеме. Но вместе с тем

сегодня меньше, чем раньше, отвергается, что большую часть физических явлений удастся вполне удовлетворительным образом сводить к механическим процессам. Этому убеждению в фундаментальном значении механики для теоретической физики мы обязаны в первую очередь кинетической теории тепла, о важнейших чертах развития которой я сейчас расскажу. При этом я не всегда буду придерживаться исторического хода развития, который в значительной мере определяется тем, в какой последовательности удавалось преодолевать известные математические трудности.

Основные гипотезы кинетической теории теплоты

Кинетическая теория материи с самого начала заимствовала из химии и кристаллографии молекулярную теорию. Согласно этой теории все физические вещества состоят из определенных частиц конечных размеров (молекул), способных двигаться только как целое и наделенных свойствами, в основном аналогичными свойствам тел, знакомых нам из повседневного опыта. Каждая такая молекула состоит из некоторого числа атомов, как правило, небольшого. Читатель-скептик может подумать, что молекулярная теория, вероятно, не дает ничего нового кроме того, что она просто переносит на молекулы те качества, с которыми мы познакомились, изучая тела нашего повседневного опыта. Очень важно показать здесь, что это не так. Очевидно, теория приобретает научную ценность только тогда, когда лежащие в ее основе предположения более просты, т. е. менее разнообразны, чем их следствия, сравниваемые с опытом.

Кроме молекулярной гипотезы кинетическая теория использует еще предположение, что к молекулам и атомам можно применять без всяких изменений законы механики, причем атомы принимаются за материальные точки. Последнее означает, что положение атома определяется заданием одной единственной точки и что, таким образом, об ориентации и, соответственно, вращении атома можно не говорить.

Общий результат теории (равномерное распределение кинетической энергии)

Теперь представим себе любую *изолированную* физическую систему тел, т. е. такую систему, которая не находится ни в каком взаимодействии с телами других систем. Согласно теории эта система состоит из чудовищно большого числа движущихся по законам механики атомов, которые действуют друг на друга с силами, зависящими только от их положения. Если мы будем следить некоторое время за одним атомом, то заметим, что его скорость вследствие взаимодействия с другими атомами принимает с течением времени самые разнообразные значения, так же

как и величина $m(c^2/2)$ (m — масса атома), которая называется его кинетической энергией. Но если мы будем следить за этим атомом достаточно долго, то из всех значений, принимаемых кинетической энергией с течением времени, мы сможем образовать некоторое среднее значение, которое мы обозначим через L . *Анализ дает теперь совершенно общий закон, что это среднее по времени значение L переменной величины $m(c^2/2)$ одинаково для всех атомов системы.* Можно представить себе, что молекула состоит из нескольких атомов, которые хотя и движутся относительно друг друга, но так, что расстояния между входящими в молекулу атомами благодаря силам их взаимодействия не могут превышать определенных пределов. Центр тяжести молекулы в каждое мгновение обладает некоторой скоростью C , определяемой скоростями ее атомов; C уместно называть скоростью поступательного движения молекулы. Если M — масса молекулы, то величину $M(C^2/2)$ можно назвать кинетической энергией поступательного движения молекулы. Анализ показывает, что среднее по времени значение этой энергии также равно L , т. е. одинаково для всех молекул системы и равно соответствующему среднему значению для отдельного атома.

Величина L служит, таким образом, всеобщей мерой интенсивности движения молекул в системе. Если две изолированные вначале системы с одинаковым значением L соединить в одну общую систему, не совершая работы и не подводя тепла (соприкосновение), то для общей системы характеризующая ее величина L будет такой же, как в обеих первоначальных системах; обмен энергией при соприкосновении не происходит. Но если исходные системы до соприкосновения обладали разными значениями L , то при соприкосновении должно происходить выравнивание их значений L , и тем самым энергия будет переходить из системы с большим значением L в систему с меньшим L . Следовательно, благодаря этому свойству величину L можно считать непосредственно мерой температуры системы; действительно, мы скоро увидим, что L с точностью до числового множителя равна так называемой абсолютной температуре.

Уравнение состояния идеального газа

Остановимся теперь специально на кинетической теории газов. В твердом и жидком состояниях вещества соседние молекулы должны действовать друг на друга с большой силой, так как эти тела, как явствует из опыта, оказывают значительное сопротивление изменению их объема. В газо- или парообразном состоянии даже соседние молекулы весьма значительно удалены друг от друга; поэтому для такого состояния естественно предполагать, что молекулы вообще движутся свободно и взаимодействуют друг с другом только в тех случаях, когда две молекулы сближаются особенно сильно (соударение). Эти

свободно движущиеся молекулы сталкиваются также со стенками сосуда, в котором находится газ, и благодаря этому производят на них давление p . Это давление можно легко вычислить чисто механическим путем, если известны объем сосуда V , интенсивность молекулярного движения L и число молекул газа n в сосуде. В результате получается

$$p = (2/3) n (L/V).$$

Этот результат содержит два положения, подтверждаемых опытом, а именно:

1. Давление газа при постоянной температуре (постоянной величине L) обратно пропорционально объему.

2. Давление газа зависит только от числа, а не от природы молекул, составляющих газ.

Последнее из этих положений можно проверять на опыте в такой степени, в какой методы химии позволяют установить соотношение между числами молекул n , содержащихся в двух разных газах.

Молекулярно-теоретический смысл абсолютной температуры

Наконец, наш результат разъясняет нам также взаимосвязь между величиной L и температурой. В учении о теплоте абсолютная температура T проще всего определяется как величина, пропорциональная давлению газа при постоянном объеме. *Наше соотношение показывает, что это определение справедливо и для величины L ; поэтому она с точностью до постоянного множителя совпадает с абсолютной температурой.* Этот постоянный множитель, как мы сейчас покажем, связан с абсолютным размером молекулы.

Именно, мы применим наше уравнение к такому количеству граммов химически простого газа, которое равно молекулярному весу (например, к двум граммам водорода); это количество вещества называется грамм-молекулой. Число молекул N в грамм-молекуле, очевидно, одинаково для всех веществ и является универсальной постоянной, определяющей абсолютный размер молекулы. Наше соотношение для одной грамм-молекулы имеет вид

$$p = (2/3)(NL/V).$$

С другой стороны, опыт дает для грамм-молекулы соотношение

$$p = RV/V,$$

где R — экспериментально найденная постоянная ($8,3 \cdot 10^7$).

Сравнивая оба соотношения, получаем

$$L = ((3/2)(R/N) \cdot T).$$

Тем самым установлена связь величин L и T .

Удельная теплоемкость одноатомных газов

Из нашего соотношения для давления газа можно получить один важный результат. По определению, L равна средней кинетической энергии атома, а следовательно, и средней кинетической энергии молекулы, если молекула одноатомная. Таким образом, величина NL , или $\frac{3}{2}RT$, равна общей кинетической энергии одной грамм-молекулы одноатомного газа и вообще равна общей энергии газа, пока эта энергия зависит от T , т. е. от интенсивности молекулярного движения. Следовательно, удельная теплоемкость одноатомного газа, отнесенная к одной грамм-молекуле, должна быть равна $\frac{3}{2}R$. Этот вывод подтверждается для всех газов, молекулы которых являются, как показывает химия, одноатомными.

До сих пор не требовалось делать какие-либо предположения о природе молекул. Поэтому согласие результатов теории с опытом следует рассматривать как важное подтверждение общих основ теории. Однако изложенное выше не может принести полного удовлетворения по следующей причине. Мы ввели в основы теории допущение, что частицы (атомы или молекулы), движение которых образует теплоту, обладают хотя и очень малыми, но вполне определенными конечными размерами. Однако, с другой стороны, сравнение с опытом результатов теории не позволяет определить истинные массы атомов и молекул. Сделать это удалось только на основе теории Клаузиуса, объяснившей кинетически три, казалось бы, совершенно разных явления, а именно внутреннее трение, теплопроводность и диффузию. Перейдем к обсуждению этой теории.

Внутреннее трение в газах

При достаточно медленном протекании газа (или же жидкости) по трубке скорость течения будет наибольшей на оси, при приближении к стенке она уменьшается и непосредственно на самой стенке обращается в нуль. Таким образом, внутренние слои скользят относительно внешних слоев, и опыт показывает, что для сохранения этого связанного с постоянным скольжением движения необходимо постоянно затрачивать работу.

Эта работа при заданном движении зависит от природы вещества и от его физического состояния; поэтому физики ввели

зависящую от физического состояния характеристическую постоянную (коэффициент внутреннего трения), определяющую силу, с которой действуют друг на друга скользящие слои газа. Это сопротивление трения кинетическая теория объясняет следующим образом. Если бы мы могли видеть движение отдельных молекул в трубе, то это движение в каждом малом объеме выглядело бы примерно так, как движение комаров в рое. Наряду с движением отдельных комаров в рое, заметно и движение роя как целого. Только это последнее движение и может заметить наблюдатель, не различающий отдельных комаров. Если рой движется как целое, то, хотя каждый отдельный комар и может двигаться с любой по величине и направлению скоростью, большое число случайно выбранных комаров роя, попадающих в поле зрения, будет двигаться в *среднем* в направлении движения роя.

Рассмотрим же теперь срединную часть трубы, в которой скорость «движения роя» в направлении оси наибольшая. Вследствие молекулярного движения эта срединная часть беспрерывно обменивается молекулами с внешними частями. Но так как вновь приходящие молекулы поступают из частей с менее быстрым «движением роя», то они будут иметь в направлении оси трубы в среднем меньшую скорость, чем это соответствует «движению роя» в срединной части. Следовательно, скорость «движения роя» в срединном слое станет убывать, если мы не позаботимся о поддержании или, лучше сказать, о постоянном возобновлении «движения роя», применяя внешнее воздействие, например, создавая разность давлений на концах трубы. Понятно, что для поддержания движения необходима постоянная затрата энергии.

При математическом исследовании этого явления фундаментальную роль играет понятие, не встречавшееся нам в прежних рассуждениях, а именно понятие «средней длины свободного пробега». Оказывается, что энергия, необходимая для поддержания заданного движения, при прочих равных условиях тем больше, чем длиннее путь, проходимый в среднем молекулой между двумя столкновениями (средняя длина свободного пробега). Теория позволяет вычислить среднюю длину свободного пробега по наблюдаемой величине внутреннего трения, для воздуха при атмосферном давлении она равна примерно одной десятитысячной миллиметра. Длина свободного пробега изменяется обратно пропорционально давлению газа.

В согласии с опытом теория дает поразительный результат: при заданном движении мощность, необходимая для его поддержания, не зависит от давления газа.

Теплопроводность в газах

Возьмем теперь газ, в котором с высотой изменяется температура, т. е. интенсивность теплового движения. Пусть наверху температура самая высокая, а внизу постепенно убывает. Как известно, тепловая энергия будет тогда перетекать из верхней части газа в нижнюю; этот процесс называется «теплопроводностью». С точки зрения молекулярной теории теплопроводность объясняется следующим образом. Через горизонтальную плоскость, мысленно проведенную на некоторой высоте в газе, бесперерывно перелетают молекулы сверху вниз и снизу вверх. Но молекулы, приходящие сверху, летят из слоев с более интенсивным тепловым движением, чем молекулы, прибывающие снизу. Поэтому первые переносят через плоскость сверху вниз в среднем большую тепловую энергию, чем вторые снизу вверх; разница и есть теплота, проходящая через плоскость.

Диффузия в газах

Если мы введем в верхнюю часть сосуда водород, а в нижнюю — азот, то, как показывает опыт, произойдет медленное перемешивание (диффузия) двух газов даже при тщательном устранении движения газов. Этот процесс с точки зрения молекулярной кинетики следует понимать совершенно так же, как теплопроводность. Именно: вследствие теплового движения молекулы обоих газов проходят через заданную плоскость с обеих сторон; но поток молекул будет преобладать с той стороны, где плотность молекул рассматриваемого газа больше.

Между коэффициентами внутреннего трения, теплопроводности и диффузии теория устанавливает соотношения, подтверждаемые опытом, по крайней мере приближенно. Это — удивительный успех кинетической теории тепла.

Вычисление числа Лошмидта

Как уже упоминалось, из коэффициента внутреннего трения (теплопроводности или диффузии) определяется длина свободного пробега молекул. Лошмидт воспользовался этим для первого (приближенного) определения истинных размеров молекул. Он рассуждал так. Длина свободного пробега определяется числом n молекул в единице объема и длиной d , равной наименьшему расстоянию между центрами двух молекул при столкновении. По длине свободного пробега просто определяется произведение nd^2 . С другой стороны, ясно, что n молекул, находящихся в единице объема, займут объем около nd^3 , если они все приблизятся друг к другу настолько, что расстояние между соседними молекулами станет равным d . Предполагая, что это приближенно реализуется в жидком состоянии (об этом говорит слабая зависимость объема жидкости от температуры), мы должны приближенно приравнять nd^3 объему такого

количества вещества в жидком состоянии, которое в газообразном состоянии будет занимать единичный объем при тех условиях, при которых определялась длина свободного пробега. Так как теперь известны величины nd^2 и nd^3 , можно найти по отдельности n и d , а значит и число N молекул в грамм-молекуле, связанное с n простой формулой. Оказалось, что диаметр самых малых молекул (d) составляет несколько десятимиллионных миллиметра и что N лежит между 10^{23} и 10^{24} . Позднее более точными методами для N были получены значения, отличающиеся от $6,8 \cdot 10^{23}$ не больше, чем на 5%.

Случай, когда средняя длина свободного пробега не мала по сравнению с размерами объема, заполненного газом

В большинстве применений кинетической теории газов предполагается, что средняя длина свободного пробега мала по сравнению с размерами тел, ограничивающих газ. Но с не меньшим успехом можно рассматривать и такие случаи, когда это предположение уже не выполняется. Если давление газа составляет одну десятитысячную атмосферы (около 0,1 мм ртутного столба), то длина свободного пробега достигает уже 1 мм. В таких случаях законы, которые установлены для свободных пробегов, исчезающе малых по сравнению с характерными размерами тел, уже не будут выполняться. Например, течение газов через трубы происходит так, как будто слой газа, непосредственно прилегающий к стенкам, скользит относительно них со скоростью, которая может быть предсказана теоретически. Особенно просты и интересны законы в том случае, когда длина свободного пробега велика по сравнению с характерным размером сосуда, например по сравнению с диаметром трубки. В этом случае действуют совсем другие законы, чем в обычно рассматриваемом случае, когда длина свободного пробега мала по сравнению с размерами сосуда. Так, например, Кнудсен нашел теоретически и подтвердил экспериментально следующее. Пусть сосуд состоит из двух полых стеклянных шаров, соединенных трубкой, диаметр которой мал по сравнению с длиной свободного пробега. Если в этих полых шарах поддерживать разные температуры так, чтобы вдоль соединительной трубки существовал перепад температур, то в сосуде с более высокой температурой давление будет выше, чем в сосуде с меньшей температурой. Следовательно, в этих случаях законы гидростатики не соблюдаются!

Приложения кинетической теории

Методы и результаты кинетической теории газов оказались плодотворными и за пределами этой теории. Дополняя теорию газов, Ван-дер-Ваальс обратил внимание на собственный объем молекул и на силы притяжения, действующие между ними; он создал теорию,

охватывающую, по крайней мере качественно, также и жидкое агрегатное состояние; Рикке и Друде, основываясь на предположении, что в тепловом движении в металлах участвуют свободные электрически заряженные элементарные частицы, создали теорию, объясняющую приближенное постоянство отношения электропроводности металлов к их теплопроводности. Неожиданным подъемом обязана кинетической теории также и теория магнетизма. Обо всем этом мы здесь только упоминаем. Подробнее же мы остановимся на двух проблемах чрезвычайной важности, а именно: на общем объяснении Больцманом сущности необратимых процессов и на достигнутом недавно понимании того, что молекулярная кинетика соответствует опыту только в определенных границах. Эти чрезвычайно важные проблемы вводят нас в круг вопросов, занимающих в настоящее время физиков-теоретиков.

Броуновское движение

Согласно молекулярно-кинетической теории тепла законы термодинамики выполняются не точно, а лишь в среднем, так что постоянно встречаются отклонения от них. Так, например, молекулы, отскакивающие от единицы поверхности стенки, ограничивающей газ, производят на нее давление, равное определенному среднему значению. Однако фактическое мгновенное значение давления не будет точно совпадать с этим средним значением, а будет испытывать самые беспорядочные флуктуации в соответствии с хаотичностью молекулярных движений, обуславливающих давление. Здесь возникает важный вопрос: можем ли мы на самом деле наблюдать эти беспорядочные флуктуации, вызванные хаотическим молекулярным движением, или же вследствие своей малости они ускользают от наблюдения? Прямо-таки ошеломляющий ответ гласит, что теория действительно предсказывает существование таких флуктуации, доступных нашему наблюдению, и что подобные явления наблюдались еще около ста лет назад.

Мы уже видели, что по теории каждая молекула движется как целое с такой скоростью, что ее средняя кинетическая энергия L равна $\frac{3}{2}(RT/N)$. Однако этот результат, как вытекает из его вывода, справедлив не только для молекул, но и для как угодно больших материальных образований, способных двигаться как целое. Из приведенного выше соотношения легко видеть, что скорость этого движения тем меньше, чем больше масса рассматриваемого образования. Частицы размером порядка одной тысячной миллиметра легко наблюдать в микроскоп. Их масса порядка 10^{-12} г. Только что приведенное соотношение дает для средней скорости молекулярного движения при обычной температуре величину 0,2 мм/с, чересчур большую для наблюдения в микроскоп. Но эта скорость все же проявляется. Частица всегда окружена некоторой средой, например

жидкостью. Если в некоторый момент частица совершает определенное движение, то вследствие трения в жидкости она очень быстро затормозится. Но вместо этого частица приобретает все новые импульсы благодаря хаотичности молекулярного движения среды. Результатом обоих этих воздействий является в высшей степени беспорядочное движение, скорость которого изменяется по величине и направлению чрезвычайно быстро, причем тем быстрее, чем большую вязкость имеет окружающая частицу среда. Частица указанного выше размера в воде проходит каждую секунду в среднем путь около одной тысячной миллиметра. Таким образом, малые частицы, взвешенные в жидкости, совершают под влиянием хаотического молекулярного движения молекул видимое в микроскоп беспорядочное движение; оно было действительно обнаружено почти сто лет назад («броуновское движение»).

Броуновское движение имеет большое значение, во-первых, потому что оно позволяет совсем точно вычислить число N , а следовательно, и абсолютный размер молекул. Ведь величина N определяет среднюю кинетическую энергию поступательного движения частицы $L = \frac{3}{2}(RT/N)$, а эта энергия в свою очередь дает среднюю величину пути, проходимого частицей за одну секунду.

Однако большое принципиальное значение броуновского движения, как уже отмечалось, заключается в том, что в нем становятся доступными непосредственному наблюдению те хаотические элементарные процессы, которые, согласно кинетической теории, составляют теплоту, содержащуюся в веществе. В какой-то мере мы видим в микроскоп непосредственно часть тепловой энергии в форме механической энергии движущихся частиц.

Это явление отчетливо показывает также, что законы феноменологической термодинамики имеют лишь приближенный смысл. Согласно этой теории, наша частица, если она вначале движется поступательно, вследствие трения о жидкость должна была бы быстро остановиться и затем оставаться в покое. Обобщая теорию броуновского движения, мы получаем точное представление о том, насколько велики в среднем вызванные хаотичностью элементарных процессов отклонения состояний произвольных физических систем от тех состояний, в которых эти системы должны застыть в покое, согласно феноменологической термодинамики.

Старое возражение против кинетической теории теплоты

Эти рассуждения подвели нас к вопросу, занимавшему теоретиков со времени установления молекулярной теории, но принципиально решенному только в 1870-х годах Больцманом. Механические процессы, к которым мы стремимся свести теплоту с помощью кинетической теории,

являются обратимыми. Это значит, что для каждого возможного движения существует другое, при котором материальная точка пробегает те же самые положения с точно такими же скоростями, но в обратной последовательности. В противоположность этому в области тепловых явлений обращенные процессы никогда не наблюдались. Например, если привести в соприкосновение два по-разному нагретых куска металла, то их температуры уравниваются. Но если привести в соприкосновение два одинаково нагретых куска металла, то сами по себе они никогда не приобретут разных температур. Из этого, казалось бы, надо сделать вывод о том, что свести тепловые явления к механическим принципиально невозможно, так как, на первый взгляд, сводить необратимые процессы к обратимым нельзя.

Ответ на возражение в духе Больцмана

Как разрешил это кажущееся противоречие Больцман*, мы постараемся показать на примере рассмотренной выше взвешенной частицы. Представим себе настолько большую взвешенную частицу, что ее броуновское движение уже почти незаметно. Какие наибольшие скорости может приобретать такая частица вследствие хаотичности теплового движения? Теория дает на это такой ответ: несмотря на то, что в среднем броуновское движение очень мало, верхней границы для скорости этого движения не существует; напротив, должны встречаться любые, даже очень большие, скорости. Но чем больше рассматриваемая скорость, тем реже она встречается, причем частота появления определенной скорости очень быстро уменьшается с ее величиной. Эту частоту появления данной скорости мы называем ее «вероятностью».

Если мы внешними средствами сообщим частице значительную скорость c , то переведем ее этим в состояние с очень малой вероятностью. Как будет изменяться эта скорость за короткое время τ , если частица предоставлена самой себе? Согласно кинетической теории, этот эксперимент, если повторять его очень часто, не всегда будет давать одинаковые результаты. В некоторой части опытов по истечении времени τ скорость частицы станет больше, чем начальная скорость c (первый случай); в остальных опытах скорость частицы по истечении τ будет меньше c (второй случай). Однако совершенно очевидно, что второй случай встречается неизмеримо чаще, чем первый; в самом деле, согласно сказанному выше более низкие скорости частиц, предоставленных самим себе, вообще должны быть более частыми (более

* Это рассуждение выглядит довольно пространным и утонченным. Но изящество и важность обсуждаемого предмета послужат достойной наградой за усилия ума.

вероятными), чем более высокие скорости. Если частица достаточно велика, то эти частоты настолько различны, что наблюдение первого случая практически исключено. Таким образом, Больцман разрешил обсуждаемое противоречие. Он показал, что, согласно кинетической теории, процесс, обратный необратимому тепловому процессу, с точки зрения термодинамики хотя и возможен принципиально, но вероятность того, что он действительно произойдет, практически равна нулю. Итак, по Больцману, усредненные опытные законы создают нам видимость необратимости тепловых процессов.

Обобщая, мы можем высказать утверждение: изменения состояния изолированной системы происходят так, что (в среднем) за менее вероятными состояниями следуют более вероятные. Ясно, что вероятность состояния должна иметь фундаментальное значение в термодинамике. Действительно, Больцману удалось показать, что энтропия состояния S , определенная термодинамически, непосредственно связана с вероятностью этого состояния W соотношением

$$S = (R/N)\ln W,$$

где R и N — введенные ранее постоянные, а $\ln W$ — натуральный логарифм вероятности состояния.

Это соотношение связывает термодинамику с молекулярной теорией. Оно дает статистические вероятности состояний даже таких систем, для которых мы не в состоянии строить молекулярно-теоретические модели. Таким образом, замечательная идея Больцмана представляет большую ценность для теоретической физики не только потому, что она устранила кажущееся противоречие, но и главным образом потому, что она дает эвристический принцип, значение которого выходит далеко за пределы молекулярной механики.

Из сказанного выше следует, что кинетическая теория тепла содержит в себе значительную долю истины. Но уже несколько лет мы знаем, что молекулярная механика имеет ограниченную область применимости; можно даже сказать, что ее общие основы, строго говоря, никогда не выполняются точно и являются правильными лишь в известном приближении. Поясним кратко это обстоятельство.

Границы применимости молекулярной механики

С точки зрения кинетической теории тепла мы должны представлять себе химически простое твердое тело как систему из чрезвычайно большого числа атомов, способных смещаться относительно друг друга, причем каждому такому смещению противодействует значительная сила, возрастающая с увеличением смещения. Представим себе, что мы

продолжительное время следим за одним из этих атомов, чтобы выяснить характер совершаемого им движения. Ради простоты будем считать, что все молекулы, за исключением рассматриваемой, удерживаются в своих состояниях равновесия. Тогда они будут противодействовать изменению положения рассматриваемого атома с силой, которая будет тем больше, чем дальше атом отклоняется от своего положения равновесия. Предоставленный сам себе, атом будет колебаться около своего положения равновесия подобно маятнику. Механическая энергия движущегося таким образом тела состоит не только из кинетической, но и из потенциальной энергии, причем при гармоническом движении (при котором период колебания не зависит от амплитуды) потенциальная энергия в среднем равна кинетической. Последняя же, в соответствии с указанными выше общими законами, равна L , или $\frac{3}{2}RT/N$, так что полная механическая энергия атома в среднем равна $3RT/N$; следовательно, энергия грамм-молекулы должны равняться $3RT$. Это рассуждение, конечно, страдает одним недостатком, а именно: оно основывается на допущении, что движения отдельных атомов не влияют друг на друга. Но это допущение не может внести значительных искажений в результат. Приравнявая эту энергию $3RT$ количеству тепла, которым обладает одна грамм-молекула, мы заключаем, что удельная теплоемкость грамм-молекулы должна равняться $3R$, или 5,97 ккал. Это действительно соответствует эмпирическому закону Дюлонга и Пти, который довольно хорошо выполняется при обычных температурах.

Но при низких температурах, вопреки результатам молекулярной механики, значение теплоемкости оказывается меньше. Вблизи абсолютного нуля она даже становится исчезающе малой! Этот результат не удивил теоретиков; ведь они уже знали, что законы излучения нагретых тел не согласуются с молекулярной механикой и что между законами теплового излучения и удельной теплоемкости должна существовать тесная связь. Однако этот результат новейших исследований показывает, что кинетическая молекулярная теория применима к осциллирующим образованиям тем хуже, чем быстрее их колебания и чем ниже температура. Современные физики все без исключения считают, что для быстрых колебательных движений малых масс законы механики не выполняются. Однако несмотря на все усилия пока не удалось изменить основы механики так, чтобы они могли удовлетворять опыту и в этой области. Проведенные до сих пор теоретические исследования связаны с теорией излучения Планка; хотя они и дали полезные формулы, но не привели к полному теоретическому пониманию.

1915 г.

Элементарная теория полета и волн на воде

Откуда берется подъемная сила крыла наших самолетов и птиц, парящих в воздухе? В этих вопросах царит полная неясность. Должен признаться, что и в специальной литературе я не мог найти на них даже простейшего ответа. Я надеюсь поэтому, что читателю доставит удовольствие, если я попытаюсь восполнить этот пробел с помощью следующих несложных рассмотрений из теории движения жидкости.

Несжимаемая жидкость, внутренним трением которой мы будем пренебрегать, течет по суживающейся трубе (рис. 1) в направлении, указанном стрелками. Нас будет интересовать распределение давления в трубе. Так как через каждое сечение в единицу времени должно

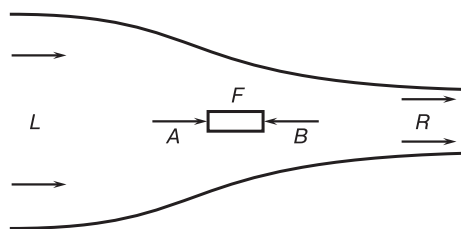


Рис. 1

протекать одно и то же количество жидкости, скорость течения q будет наибольшей там, где площадь сечения минимальна, и наименьшей там, где площадь сечения максимальна. Поэтому на рис. 1 скорость частиц жидкости наименьшая в точке L и непрерывно возрастает по направлению к R .

Причиной, вызывающей такое ускорение частиц жидкости, является не что иное, как действующая на них сила давления. Рассмотрим частицу F жидкости, занимающую цилиндрический объем. Чтобы эта частица жидкости F имела в данный момент ускорение, направленное вправо, давление на ее заднюю поверхность A должно быть больше давления на ее переднюю поверхность B . Давление на поверхность A превосходит давление на поверхность B . Повторяя

Elementare Theorie der Wasserwelle und des Fluges. Naturwiss, 1916, 4. Jahrgang, 509–510.

эти рассуждения, мы приходим к заключению, что давление в трубе непрерывно падает от L к R . Такое же распределение давления (убывание давления от L к R) мы получим с помощью аналогичного рассуждения и в том случае, когда направление течения жидкости изменится на обратное.

Обобщая сказанное, мы можем сформулировать следующую хорошо известную теорему гидродинамики невязкой жидкости. Если мы проследим за траекторией какой-нибудь частицы жидкости в стационарном потоке, то давление p всегда будет больше там, где скорость его q меньше, и наоборот. Как известно, количественное выражение этой теоремы для несжимаемых жидкостей имеет вид

$$p = \text{const} - \frac{1}{2}\rho q^2,$$

где ρ — плотность жидкости.

Рассмотрим прежде всего один общеизвестный пример, иллюстрирующий эту теорему, — истечение жидкости, находящейся под постоянным давлением, из отверстия (Торричелли). В точке J (рис. 2) давление больше, а скорость, наоборот, меньше, чем в точке A , так что выражение

$$p + \frac{1}{2}\rho q^2$$

постоянно во внешней струе.

В качестве второго примера рассмотрим пульверизатор (рис. 3). Воздушный поток, проходящий по трубке L , после выхода из отверстия расширяется во все стороны, уменьшая при этом свою скорость. Поэтому давление в точке P меньше, чем в точке G , и, следовательно, меньше, чем в окружающей точку P покоящемся воздухе. Жидкость из сосуда Q за счет пониженного давления в точке P поднимается вверх и разбрызгивается потоком воздуха на мелкие капельки. (То, что в этом

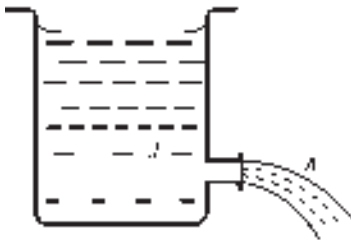


Рис. 2

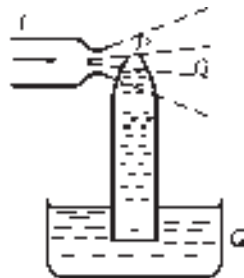


Рис. 3

примере мы имеем дело с потоком воздуха, а не с потоком несжимаемой жидкости, в сущности ничего не меняет в наших рассуждениях.)

После этих приготовлений обратимся к рассмотрению волн на воде. Пусть W — твердая стенка, имеющая вид волнистого цилиндра и расположенная перпендикулярно к плоскости чертежа, с одной стороны граничит с потоком жидкости, текущим слева направо

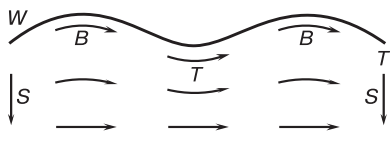


Рис. 4

(рис. 4). Нас будет интересовать сила, с которой жидкость действует на стенку. Ясно, что поперечное сечение потока жидкости в точках B больше, чем в точках T . Следовательно, вблизи точек B жидкость будет течь медленнее, а вблизи точек T — быстрее, чем в тех точках внутри жидкости, которые расположены вдали от стенки W . Поэтому вблизи точек B поток жидкости будет создавать избыточное давление, а вблизи точек T будет наблюдаться разрежение. В результате жидкость будет давить на стенку так, как будто она стремится увеличить ее изгиб. Это означает, что поток не мог бы поддерживаться, если бы поверхность жидкости была свободной и, соответственно, если бы стенка могла неограниченно изгибаться и растягиваться*.

В этих рассуждениях, как и ранее, мы исходили из предположения, что не существует никаких других причин, вызывающих давление, кроме течения жидкости. Если же в направлении стрелки S действует сила тяжести, то она приводит к появлению в жидкости силы давления, убывающей сверху вниз. Если бы действовала только одна сила тяжести, то давление в точках B было бы меньше, чем в точках T .

Итак, течение и сила тяжести порождают предпосылки к появлению различных разностей давления между точками B и T . Ясно, что можно так подобрать скорость течения жидкости, что обусловленные обеими причинами результирующие разности давлений между точками B и T будут равны нулю. После этого стенку W можно удалить, не внося при этом никаких возмущений в течение жидкости. В результате мы получим течение жидкости с волнообразно искривленной поверхностью, какую часто можно наблюдать при обтекании потоком какого-нибудь препятствия. Такую картину мы наблюдаем, глядя с моста в воду, если стоим над опорой.

Если же мы задумаем описать весь процесс с точки зрения наблюдателя, движущегося направо со скоростью потока вдали от стенок, то

* Известно, что эти же соображения позволяют объяснить, почему флаг полощется на ветру.

мы придем к обычным волнам на поверхности воды. Для этого наблюдателя жидкость остается в покое, а гребни B и впадины T уплывают с постоянной скоростью назад.

Следовательно, возможность волнообразовательных процессов основывается на том, что статические и динамические разности давления, возникающие между точками с различной высотой, взаимно погашают друг друга.

Совершенно аналогично выглядит и объяснение причин, обуславливающих появление подъемной силы крыла. Пусть в поток жидкости или воздуха вставлена твердая стенка, расположенная параллельно потоку и перпендикулярно плоскости чертежа (рис. 5), на верхней поверхности которой имеется выпуклость. Если бы не было этой выпуклости, то на поверхность стенки, если не считать неизбежного трения, не действовало бы никаких сил. Выпуклость же будет влиять на течение жидкости как у верхней, так и у нижней поверхности стенки, и, таким образом, создаст дополнительное давление.

Для потока, обтекающего стенку снизу, выпуклость создаст местное увеличение поперечного сечения и, следовательно, замедление течения; в результате этого увеличится давление в точке U . На верхней же поверхности, наоборот, выпуклость означает уменьшение поперечного сечения, а значит,

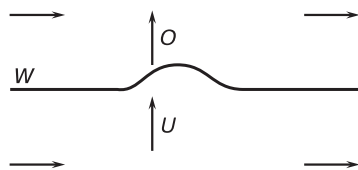


Рис. 5.

местное повышение скорости потока и тем самым падение давления в точке O . Таким образом, динамические силы давления, производимого потоком, создают силу, действующую на стенку и направленную вверх. Ясно, что для появления этой силы необходимо лишь, чтобы кусок стенки был настолько велик, насколько это требуется для заметного изгибания потока жидкости. Мы получаем несущее крыло самолета или птицы (не машущей крыльями в полете).

Уже из этих простейших рассуждений видно, что для полета требуется лишь определенная мощность, поскольку необходимо преодолеть сопротивление неизбежного трения. Если бы трения не было, птицы могли бы летать на любые расстояния по горизонтали, не затрачивая при этом никакой работы.

Причины образования извилин в руслах рек и так называемый закон Бэра

Общеизвестно, что русла рек имеют тенденцию приобретать извилистую форму, вместо того чтобы следовать линии максимального уклона местности. Географам также хорошо известно, что реки северного полушария размывают главным образом правый берег. Реки южного полушария ведут себя противоположным образом (закон Бэра). Предпринималось много попыток для объяснения этого явления, и я не уверен, будет ли для знатоков новым то, что я скажу ниже; некоторая часть моих соображений, несомненно, является уже известной. Тем не менее, не найдя никого, кто бы до конца был знаком с причинами обсуждаемых эффектов, я считаю уместным дать здесь их краткое качественное описание.

Прежде всего ясно, что эрозия должна быть тем сильнее, чем больше скорость потока там, где он касается рассматриваемого берега; точнее, эрозия должна быть сильнее в том месте ограничивающей стенки, где скорость потока наиболее быстро падает до нуля. Это является правильным при всех обстоятельствах, независимо от того, обусловлена ли эрозия механическими или физико-химическими факторами (разложение почвы). Поэтому нам следует сконцентрировать свое внимание на обстоятельствах, которые влияют на величину градиента скорости у стенки.

В обоих случаях асимметрия обсуждаемого падения скорости косвенно обусловлена образованием циркуляции, на которой мы и сосредоточим наше внимание. Я начну с небольшого эксперимента, который каждый может легко повторить.

Представим себе чашку с плоским дном, полную чая. Пусть на дне ее имеется несколько чайнок, которые остаются там, так как оказываются тяжелее вытесняемой ими жидкости. Если с помощью ложки

Die Ursache der Maanderbildung der Flusslaufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes. Naturwiss., 1926, 14, 223–224.

привести во вращение жидкость в чашке, то чайники быстро соберутся в центре дна чашки. Объяснение этого явления заключается в следующем. Вращение жидкости приводит к появлению центробежных сил. Эти силы сами по себе не могли бы привести к изменению потока жидкости, если бы последняя вращалась как твердое тело. Но слои жидкости, находящиеся по соседству со стенками чашки, задерживаются благодаря трению, так что угловая скорость, с которой они вращаются, оказывается меньше, чем в других местах, более близких к центру. В частности, угловая скорость вращения, а, следовательно, и центробежная сила, будут вблизи дна меньше, чем вдали от него. Результатом этого явится круговое движение жидкости, подобное изображенному на рис. 1, которое возрастает до тех пор, пока под влиянием трения не станет стационарным. Чайники сносятся в центр круговым движением, чем и доказывают его существование.



Рис. 1

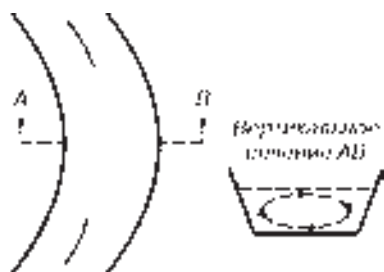


Рис. 2

Подобного же рода явление происходит в искривленном речном потоке (рис. 2). В каждом его поперечном сечении, там, где он искривлен, центробежная сила действует в направлении наружной стороны поворота реки (от A к B). Эта сила около дна, где скорость течения ослаблена трением, оказывается меньше, чем соответствующая сила в слоях, более высоко расположенных над дном. Это обуславливает круговое движение, показанное на рис. 2. Даже там, где нет искривлений реки, круговое движение, подобное показанному на рис. 2, будет все-таки происходить, хотя и в небольших масштабах, как результат вращения Земли. Последнее приводит к появлению силы Кориолиса, действующей перпендикулярно направлению течения, правая горизонтальная составляющая которой равна $2v\Omega \sin \varphi$ на единицу массы жидкости, где v — скорость течения, Ω — угловая скорость вращения Земли и φ — географическая широта. Так как трение о грунт приводит к уменьшению этой силы при приближении ко дну, то эта сила также приводит к возникновению кругового движения, типа показанного на рис. 2.

После этого предварительного обсуждения вернемся к вопросу о распределении скоростей по поперечному сечению потока, что является определяющим фактором в эрозии. Для этой цели мы прежде всего должны ясно представить себе, как развивается и сохраняется (турбулентное) распределение скоростей. Если вода, сначала находившаяся в покое, вдруг была бы приведена в движение действием равномерно распределенной силы, то распределение скоростей по поперечному сечению оставалось бы сначала равномерным. Распределение скоростей, постепенно возрастающих от ограничивающих стенок в направлении к центру поперечного сечения, установилось бы лишь спустя некоторое время под влиянием трения о стенки. Нарушение (грубо говоря) стационарного распределения скоростей по поперечному сечению произойдет также постепенно под влиянием трения жидкости.

Гидродинамика следующим образом описывает процесс, в результате которого устанавливается это стационарное распределение скоростей. В плоском (потенциальном) потоке все вихревые нити сконцентрированы у стенок. Они отделяются и медленно движутся к центру поперечного сечения русла, распределяясь по слою возрастающей толщины. В связи с этим градиент скорости у стенок постепенно уменьшается. Под действием внутреннего трения жидкости во внутренней части поперечного сечения вихревые нити постепенно поглощаются; их место занимают новые, образующиеся у стенок. Так образуется квазистационарное распределение скоростей. Для нас важным является то, что достижение стационарного распределения скоростей является медленным процессом. Вот почему относительно небольшие постоянно действующие причины способны оказывать значительное влияние на распределение скоростей по поперечному сечению.

Рассмотрим теперь, какое влияние оказывает круговое движение, обусловленное изгибом реки или кориолисовой силой, на распределение скоростей по поперечному сечению реки (см. рис. 2). Частицы жидкости, движущиеся наиболее быстро, оказываются дальше всего от стенок, т. е. в верхней части на середине реки. Эти наиболее быстро движущиеся частицы воды будут переноситься циркуляцией к правому берегу, в то время как к левому будет поступать вода, приходящая из области близ дна и имеющая особо малую скорость. Следовательно, в случае, изображенном на рис. 2, эрозия неизбежно сильнее у правого берега, чем у левого. Следует отметить, что это объяснение существенно основано на том, что медленное циркуляционное движение воды оказывает значительное влияние на распределение скоростей, потому что регулирование скоростей внутренним трением,

противодействующее влиянию циркуляционного движения, также является медленным процессом.

Мы показали причины образования извилин (меандр) реки. Однако на основе сказанного также могут быть без труда выяснены некоторые дополнительные детали. Эрозия окажется относительно более сильной не только у правого берега, но также и в правой половине дна, так что возникнет тенденция к образованию профиля, показанного на рис. 3.

Более того, на поверхность будет приходить вода от левого берега, и поэтому, в особенности у левого берега, она будет двигаться с меньшей скоростью, чем в несколько более низких слоях. Это и наблюдается в действительности. Далее следует отметить, что круговое движение обладает

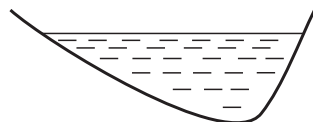


Рис. 3

инерцией. Поэтому циркуляция будет достигать своего максимума несколько дальше места с наибольшей кривизной; то же самое относится к асимметрии эрозии. Следовательно, в процессе эрозии извилистая линия реки должна смещаться в направлении течения. Наконец, в случае большего поперечного сечения реки циркуляционное движение медленнее уничтожается трением; поэтому размеры извилин реки будут возрастать с увеличением поперечного сечения реки.

1926 г.

Приложение 3
К БИОГРАФИИ ЭЙНШТЕЙНА

Основные даты жизни А. Эйнштейна

1876 г.

— 8 августа в Ганштатте сочетаются браком Герман Эйнштейн (род. в 1847 г.) и Паулина Кох (род. в 1858 г.).

1879 г.

— 14 марта в 11 ч 30 мин по их месту жительства (Ульм, Банхофштрассе, 135) родился первый их ребенок, Альберт.

1880 г.

— 21 июня семья Эйнштейнов регистрируется в качестве жителей Мюнхена.

1881 г.

— 18 ноября родилась сестра Альберта Мария (Майя).

1884 г.

— первое чудо: Эйнштейн очарован карманным компасом. Он начинает заниматься с частным учителем.

1885 г.

— Эйнштейн начинает учиться игре на скрипке (и продолжает занятия до 13 лет).

1886 г.

— поступление в школу в Мюнхене. Чтобы удовлетворить формальным требованиям о религиозном образовании, дома проводится обучение элементам иудаизма.

Источник: *Pais A.* «Subtle is the Lord...» The science and the life of Albert Einstein. — Oxford University Press. 1982.

1888 г.

— поступление в гимназию Луитпольда.

1889 г.

— первая встреча с Максом Талмудом (впоследствии взявшим имя Талми), в то время 21-летним студентом-медиком, познакомившим Эйнштейна с «Популярными книгами по физике» Бернштейна, «Силой и материей» Бюхнера, «Критикой чистого разума» Канта и другими книгами. Талмуд регулярно бывает в доме Эйнштейнов до 1894 г.

1890 г.

— религиозный период, продолжавшийся около года.

1891 г.

— второе чудо: знакомство со «священной книгой по геометрии».

1891–1895 гг.

— знакомство с элементами высшей математики, включая дифференциальное и интегральное исчисление.

1894 г.

— семейство переезжает в Италию, сначала в Милан, затем в Павию, а потом обратно в Милан. Альберт остается в Мюнхене до окончания гимназии.

1895 г.

— Альберт посылает своему дяде Цезарю Коху, живущему в Бельгии, эссе «К рассмотрению состояния эфира в магнитном поле»;

— бегство из гимназии Луитпольда до окончания обучения. Весной Альберт приезжает к семье в Павию;

— осенью он не поступает в Цюрихский политехникум, хотя отлично сдает экзамены по физике и математике;

28 октября 1895 г. — начало осени 1896 г.: обучение в кантональной школе Аарау. Альберт живет в доме «папы» Йоста Винтелера, одного из своих учителей. В этот период он пишет на французском языке сочинение «Мои планы на будущее».

1896 г.

— 28 января Эйнштейн получает свидетельство о том, что он больше не является гражданином Германии (точнее, Вюртемберга). В течение следующих пяти лет он не имел гражданства;

— осенью Эйнштейн получает в Аарау диплом, дающий право преподавания в средней школе и позволяющий быть зачисленным в Цюрихский политехникум; 29 октября он поселяется в Цюрихе. Среди его сокурсников — Марсель Гроссман и Милева Марич (или Марити).

1897 г.

— встреча в Цюрихе с Мишелем Анжелом Бессо, которая положила начало дружбе, длившейся всю жизнь.

1899 г.

— 19 октября Эйнштейн обращается с официальным прошением о предоставлении ему швейцарского гражданства.

1900 г.

— 27 июля экзаменационный совет ходатайствует о выдаче дипломов среди прочих Гроссману и Эйнштейну; 28 июля ходатайство удовлетворяется;

— осень: безуспешные попытки получить должность ассистента в Политехникуме;

— 13 декабря Эйнштейн посылает из Цюриха в журнал «Annalen der Physik» свою первую работу.

1901 г.

— 21 февраля: получение швейцарского гражданства;

— 13 марта Эйнштейна признают негодным к несению военной службы в швейцарской армии из-за плоскостопия и варикозного расширения вен;

— март—апрель: безуспешные попытки получить работу у Оствальда в Лейпциге и у Камерлинг-Оннеса в Лейдене;

— 19 мая — 15 июля: временная работа в качестве преподавателя математики в технической школе Винтертура, где Эйнштейн оставался до 14 октября;

— сентябрь 1901 г. — январь 1902 г.: временная работа в качестве учителя в Шафхаузене;

— 18 декабря: направление заявления с просьбой принять в штат Бернского патентного бюро.

1902 г.

— 21 февраля Эйнштейн переезжает в Берн. Вначале он живет только на средства, посылавшиеся родителями, и на доход от частных уроков математики и физики;

- 16 июня Федеральный совет Швейцарии назначает Эйнштейна экспертом третьего класса Бернского патентного бюро (с испытательным сроком) с окладом 3500 франков в год. Он приступает к работе 23 июня;
- 10 октября: смерть отца в Милане.

1903 г.

- 6 января: женитьба на Милеве Марич;
- Конрад Габихт, Морис Соловин и Эйнштейн основывают «Академию Олимпия»;
- 5 декабря Эйнштейн выступает на заседании Общества естествоиспытателей Берна с докладом «Теория электромагнитных волн».

1904 г.

- 14 мая родился первый сын, Ганс Альберт (ум. в 1973 г. в Беркли, Калифорния);
- 16 сентября по окончании испытательного срока Эйнштейн получает постоянный контракт.

1905 г.

- 17 марта: окончание работы над статьей, в которой излагается гипотеза световых квантов;
- 30 апреля: завершение диссертации на тему «Новое определение размеров молекул». Диссертация, напечатанная в Берне и представленная в Цюрихский университет, была принята в июле. Она имела посвящение: «Моему другу доктору М. Гроссману»;
- 11 мая редакция журнала «Annalen der Physik» получает первую статью А. Эйнштейна о броуновском движении;
- 30 июня в редакцию поступает первая статья о специальной теории относительности;
- 27 сентября в редакцию поступает вторая статья о специальной теории относительности. В ней приводится соотношение $E = mc^2$;
- 19 декабря в редакцию поступает вторая статья о броуновском движении.

1906 г.

- 1 апреля Эйнштейн повышен в должности; он становится экспертом второго класса с годовым жалованьем 4500 франков в год;
- ноябрь: окончание работы об удельной теплоемкости твердых тел, самой первой статьи по квантовой теории твердого тела.

1907 г.

— «Счастливейшая мысль в моей жизни»: Эйнштейн устанавливает принцип эквивалентности для равноускоренных механических систем. Он распространяет его на электромагнитные явления, дает правильное выражение для красного смещения и отмечает, что из этого принципа следует также искривление световых лучей, проходящих около массивных тел, но считает этот эффект ненаблюдаемым из-за его малости;

— 17 июня Эйнштейн обращается в Бернский университет с просьбой предоставить ему должность приват-доцента. Просьба не удовлетворена, так как не представлена обязательная в таком случае еще не опубликованная работа.

1908 г.

— 28 февраля: после вторичной попытки Эйнштейн получает должность приват-доцента в Берне. Представленная не опубликованная ранее работа называется «Влияние закона распределения энергии в излучении черного тела на состав излучения»;

— в начале года к Эйнштейну приезжает первый сотрудник Я. Лауб; они пишут вместе две статьи;

— 21 декабря Майя с отличием защищает в Бернском университете диссертацию по романской филологии.

1909 г.

— в марте и октябре Эйнштейн заканчивает две статьи, в каждой из которых содержатся новые гипотезы, касающиеся теории излучения черного тела. В них, если пользоваться современной терминологией, предлагаются принцип дополнительности и принцип соответствия. Октябрьская работа была представлена на конференции в Зальцбурге — первой физической конференции, в которой участвовал Эйнштейн;

— 6 июля: заявление об увольнении (с 15 октября) из патентного бюро. Отставка с должности приват-доцента;

— 8 июля Эйнштейн получает первое почетное докторское звание от Женевского университета (позднее Эйнштейн получил также почетные степени от университетов Цюриха, Росток, Мадрида, Брюсселя, Буэнос-Айреса, Лондона, Оксфорда, Кембриджа, Глазго, Лидса, Манчестера, Гарварда, Принстона, Нью-Йорка (Олбени), Йешива и Сорбонны — скорее всего, этот перечень неполон);

— 15 октября Эйнштейн вступает в должность экстраординарного профессора Цюрихского университета с начальным окладом 4500 франков в год.

1910 г.

- 28 июля рождается второй сын, Эдуард («Тед» или «Тедель», ум. в 1965 г. в психиатрической лечебнице в Цюрихе);
- октябрь: завершение работы о критической опалесценции, последней крупной статьи в области классической статистической физики.

1911 г.

- император Франц-Иосиф подписывает декрет, которым Эйнштейн с 1 апреля назначается профессором Пражского университета Карла-Фердинанда;
- март: переезд в Прагу;
- июнь: Эйнштейн осознает, что искривление лучей света может быть экспериментально установлено во время затмения Солнца. Он рассчитывает угол отклонения равным $0,83''$ (вдвое меньше правильного значения);
- 30 октября — 3 ноября: первый Сольвеевский конгресс. Эйнштейн делает заключительный доклад «К современному состоянию проблемы удельной теплоемкости».

1912 г.

- начало февраля: назначение профессором Цюрихского политехникума;
- август: переезд в Цюрих.

1912–1913 гг.

- сотрудничество с Гроссманом (занимающим пост профессора математики в Политехникуме) в создании основ общей теории относительности. Тяготение впервые описывается метрическим тензором. Авторы считают, что им удалось доказать, будто уравнения гравитационного поля не могут быть общековариантными.

1913 г.

- весна: в Цюрих приезжают Планк и Нернст чтобы выяснить отношение Эйнштейна к переезду в Берлин. Ему предлагается членство в Прусской академии наук, должность профессора Берлинского университета без обязательной учебной нагрузки и пост директора организуемого Физического института имени кайзера Вильгельма;
- 12 июня: Планк, Нернст, Рубенс и Варбург официально представляют кандидатуру Эйнштейна к избранию в члены Прусской академии наук;

- 3 июля: предложение принимается 21 голосом «за» и одним «против» (и 12 ноября утверждается императором Вильгельмом II);
- 7 декабря: Эйнштейн принимает предложение из Берлина.

1914 г.

- 6 апреля: переезд всей семьи в Берлин. Вскоре после этого Эйнштейны расходятся. Милева с сыновьями возвращается в Цюрих.
- 26 апреля: в берлинской газете «Die Vossische Zeitung» публикуется первая газетная статья Эйнштейна. В ней идет речь о теории относительности;
- 2 июля Эйнштейн произносит речь при вступлении в должность на заседании Прусской академии наук;
- 1 августа: начало первой мировой войны.

1915 г.

- начало года: выполнение вместе с де Хаазом гиромангнитных экспериментов в Физико-техническом институте в Шарлоттенбурге;
- Эйнштейн подписывает «Обращение к жителям Европы», в котором все, кому дорога европейская культура, призываются к объединению в «Европейскую лигу»; это, видимо, первый политический документ, подписанный Эйнштейном;
- конец июня — начало июля: Эйнштейн читает в Геттингенском университете шесть лекций об общей теории относительности («К моей радости, мне удалось полностью убедить Гильберта и Ф. Клейна»);
- 4 ноября: возврат к требованию общей ковариантности в общей теории относительности с тем, однако, ограничением, что допускаются лишь унимодулярные преобразования;
 - 11 ноября: замена требования унимодулярности еще более жестким требованием $(-\det g_{\mu\nu})^{1/2} = 1$;
 - 18 ноября: первые постньютоновы результаты. Эйнштейн получает для векового смещения перигелия Меркурия значение $43''$. Он также обнаруживает, что угол, на который отклоняются лучи света, вдвое больше значения, полученного им в 1911 г.;
 - 20 ноября: Давид Гильберт представляет в Геттингенское научное общество статью, содержащую в окончательном виде уравнения гравитационного поля (а также излишнее предположение о структуре тензора энергии-импульса);
 - 25 ноября: завершение создания логической схемы общей теории относительности. Отказ от ограничений, введенных 4 и 11 ноября.

1916 г.

- 20 марта в редакцию журнала «Annalen der Physik» поступает первое систематическое изложение общей теории относительности — статья Эйнштейна «Основы общей теории относительности». В том же году, некоторое время спустя, эта работа выходит в виде книги;
- 5 мая: Эйнштейн сменяет Планка на посту президента Немецкого физического общества;
- июнь: первая статья Эйнштейна о гравитационных волнах. Он обнаруживает (выражаясь современным языком), что гравитон имеет лишь два состояния поляризации;
- июль: возврат к квантовой теории. В течение следующих восьми месяцев вышли три пересекающиеся по теме статьи, в которых даны выражения для коэффициентов спонтанного и индуцированного излучения и поглощения, новый вывод закона Планка и сделано первое публичное заявление в печати о том, что световой квант с энергией $h\nu$ переносит импульс $h\nu/c$. Первые признаки беспокойства по поводу роли «случая» в квантовой физике;
- декабрь: Эйнштейн заканчивает статью «О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение)», самый известный из всех его трудов, впоследствии переведенный на многие языки;
- декабрь: император утверждает назначение Эйнштейна членом совета управляющих Физико-технического института. Он выполнял эти функции с 1917 по 1933 г.

1917 г.

- февраль: первая работа Эйнштейна по космологии, где он вводит космологический член;
- Эйнштейн переносит заболевание печени, желтуху; у него обнаруживают язву желудка. За ним ухаживает двоюродная сестра Эльза (выздоровление наступит лишь в 1920 г.);
- 1 октября начинает работать Институт имени кайзера Вильгельма (экспериментальная и теоретическая физика), директором которого является Эйнштейн.

1918 г.

- февраль: вторая работа о гравитационных волнах; в ней содержится квадрупольная формула;
- ноябрь: Эйнштейн отклоняет предложение переехать в Цюрих, направленное совместно из университета и политехникума.

1919 г.

- январь—июнь: большую часть этого периода Эйнштейн проводит в Цюрихе, читая серию лекций в университете;
- 14 февраля: развод с Милевой;
- 29 мая предоставляется возможность измерить отклонение лучей света во время полного солнечного затмения. Наблюдения выполняются под руководством Эддингтона на острове Принсипи и под руководством Кроммелина на севере Бразилии;
- 2 июня: женитьба на разведенной двоюродной (по материнской линии) и троюродной (по отцовской линии) сестре Эльзе Эйнштейн-Ловенталь (род. в 1876 г.). Еще раньше обе ее дочери, Ильзе (род. в 1897 г.) и Марго (род. в 1899 г.), официально приняли фамилию Эйнштейн;
- 22 сентября Эйнштейн получает от Лоренца телеграмму, в которой говорится, что предварительный анализ данных наблюдения майского затмения дает смещение в пределах от «значения Ньютона» (0,86") до «значения Эйнштейна» (1,73");
- 6 ноября на совместном заседании Королевского общества и Королевского астрономического общества в Лондоне объявлено, что наблюдения майского затмения подтверждают расчеты Эйнштейна;
- 7 ноября: заголовки в лондонской «Times» («Революция в науке», «Новая теория строения Вселенной», «Отказ от взглядов Ньютона»);
- 9 ноября: заголовок в «New York Times» («Свет в небесах перекопился... Триумф теории Эйнштейна»). Такого рода высказывания в газетах знаменуют начало отношения общественности к Эйнштейну как к личности мирового масштаба;
- декабрь: Эйнштейн получает единственную присвоенную ему в Германии почетную степень доктора медицины от университета Ростка;
- беседы о сионизме с Куртом Блюменфельдом.

1920 г.

- 12 февраля; беспорядки во время чтения Эйнштейном лекции в Берлинском университете;
- февраль: смерть матери в доме Эйнштейна;
- июнь: чтение лекций в Норвегии и Дании;
- первая встреча с Бором в Берлине;
- 24 августа: массовый митинг протеста против общей теории относительности в Берлине, на котором присутствовал Эйнштейн;

— 27 августа: публикация в «Berliner Tageblatt» гневной отповеди Эйнштейна. Немецкие газеты сообщают о его намерении покинуть Германию. Лауэ, Нернст, Рубенс, а также министр культуры Конрад Хениш выражают свою солидарность с заявлениями Эйнштейна;

— 8 сентября: Эйнштейн направляет Хенишу письмо, в котором говорит, что с Берлином его связывают самые тесные человеческие и научные связи. Он добавляет, что откликнется на предложения из-за рубежа лишь в том случае, если его вынудят к этому внешние обстоятельства;

— 23 сентября: стычка с Филиппом Ленардом на конференции в Бад-Наугейме;

— 27 октября Эйнштейн читает лекцию при вступлении в специально созданную для него в Лейдене должность приглашенного профессора. Эта должность позволяла ему приезжать в Лейден на несколько недель в году (должность была официально упразднена 23 сентября 1952 г.);

— начиная с 1920 г. Эйнштейн выступает в печати со статьями, посвященными общественным проблемам;

— 31 декабря: награждение орденом «За заслуги».

1921 г.

— 2 апреля—30 мая: первая поездка в США (совместно с Х. Вейцманом) для сбора средств с целью создания университета Хебрю в Иерусалиме. Вручение в Колумбийском университете медали Барнарда. Прием президентом Гардингом в Белом доме. Поездки с лекциями по теории относительности в Чикаго, Бостон и Принстон. На обратном пути Эйнштейн делает остановку в Лондоне и посещает могилу Ньютона.

1922 г.

— январь: завершение первой работы по единой теории поля;

— март—апрель: поездка в Париж способствует нормализации отношений между Францией и Германией;

— Эйнштейн принимает предложение участвовать в работе Комитета Лиги Наций по интеллектуальному сотрудничеству (Германия будет принята в Лигу Наций лишь через четыре года);

— 8 октября: Эйнштейн и Эльза отправляются из Марселя в Японию. По пути они посещают Коломбо, Сингапур, Гонконг и Шанхай;

— 9 ноября Эйнштейну присуждается Нобелевская премия по физике за 1921 г. Он находится в это время на пути в Японию, где пробудет до 29 декабря;

— 10 декабря на торжествах по поводу вручения Нобелевских премий Эйнштейна представляет посол Германии Рудольф Надольны. Официальный текст представления гласит: «А. Эйнштейну за его заслуги в области теоретической физики и в особенности за открытие закона фотоэлектрического эффекта». (После возвращения Эйнштейна из Японии премию вручил ему на дому посол Швеции.)

1923 г.

— 2 февраля, на обратном пути из Японии, Эйнштейн совершает 12-дневную поездку по Палестине; 8 февраля он становится первым почетным гражданином Тель-Авива. По пути из Палестины в Германию Эйнштейн посещает Испанию;

— март: разочаровавшись в эффективности (но не в целях) Лиги Наций, Эйнштейн покидает ее Комитет по интеллектуальному сотрудничеству;

— июнь—июль: помогает основать общество «Друзей новой России» и становится членом его исполнительного комитета (общество было распущено в 1933 г.);

— июль: лекция о теории относительности в Гетеборге. Открытие эффекта Комптона кладет конец длительному сопротивлению понятию фотона;

— декабрь: впервые Эйнштейн публикует статью, в которой содержится предположение о том, что квантовые эффекты могут следовать из переопределенных общерелятивистских уравнений поля.

1924 г.

— в знак солидарности Эйнштейн становится членом еврейской общины Берлина и платит туда взносы;

— редактирование первого сборника научных статей физического факультета университета Хебрю;

— в Потсдаме начинает работать «Институт Эйнштейна», расположенный в «башне Эйнштейна». Основным научным прибором там является «телескоп Эйнштейна»;

— июнь: возобновление работы в Комитете по интеллектуальному сотрудничеству;

— 7 июня Эйнштейн заявляет, что он не возражает против мнения Министерства культуры Германии, согласно которому избрание его членом Прусской академии автоматически означает приобретение им прусского гражданства (он сохраняет и швейцарское гражданство);

— декабрь: последнее крупное достижение Эйнштейна — из рассмотрения статистики флуктуации ему удается привести незави-

симые аргументы в пользу существования волн материи. В это же время обнаружена им и конденсация Бозе—Эйнштейна.

1925 г.

- май—июнь: поездка в Южную Америку. Посещение Буэнос-Айреса, Рио-де-Жанейро и Монтевидео;
- Эйнштейн подписывает (вместе с Ганди и др.) воззвание, призывающее отказаться от обязательной военной службы;
- награждение медалью Копли;
- член Совета управляющих университета Хебрю (до июня 1928 г.).

1926 г.

- награждение золотой медалью Королевского астрономического общества.

1927 г.

- октябрь: пятый Сольвеевский конгресс. Начало знаменитого диалога Эйнштейн — Бор по фундаментальным проблемам квантовой механики.

1928 г.

- февраль или март: упадок сил в результате физического перенапряжения. У Эйнштейна обнаружено расширение сердца. В течение четырех месяцев он на постельном режиме и бессолевой диете. Он полностью выздоравливает, но испытывает слабость в течение еще около года.

1929 г.

- Эйнштейна впервые принимает королевская семья Бельгии. Он завязывает дружбу с королевой Елизаветой, с которой поддерживает переписку до конца дней;
- 28 июня: Планк получает первую, а Эйнштейн вторую медаль имени Планка. Во время церемонии ее вручения Эйнштейн заявляет, что ему «неловко» получать столь высокую награду, так как все, что он сделал в квантовой физике, есть только «случайные удачи» в ходе «безуспешных попыток решить проблему в целом».

1930 г.

- родился первый внук Бернанд Цезар, сын Ганса Альберта;
- май: Эйнштейн подписывает манифест Международной лиги женщин за мир и свободу, призывающий ко всеобщему разоружению;

- 11 декабря — 4 марта 1931 г.: вторая поездка в США. В основном Эйнштейн работает в Калифорнийском технологическом институте;
- 13 декабря мэр Нью-Йорка Джимми Уокер вручает Эйнштейну ключ от города;
- 19–20 декабря: поездка на Кубу.

1931 г.

- апрель: отказ от космологического члена, как от излишнего и неоправданного предположения;
- 30 декабря — 4 марта 1932 г.: третья поездка в США. Пребывание в основном в Калифорнийском технологическом институте.

1932 г.

- февраль: будучи в Пасадене, Эйнштейн протестует против обвинения немецкого пацифиста Карла фон Осецкого в измене;
- апрель: окончательный выход из Комитета по интеллектуальному сотрудничеству;
- октябрь: назначение профессором Института высших исследований в Принстоне, Нью-Джерси. Первоначально Эйнштейн планировал делить свое время поровну между Берлином и Принстоном;
- 10 декабря: отъезд вместе с Эльзой из Германии в США. Планировалось, что это будет непродолжительная поездка, но в Германию они больше не вернулись.

1933 г.

- 30 января: приход нацистов к власти;
- 20 марта нацисты совершают налет на летний дом Эйнштейна в Капуте, где коммунисты якобы хранили оружие;
- 28 марта, по возвращении в Европу, Эйнштейн выходит из Прусской академии наук. Они с женой останавливаются в Ле-Кок-сюр-мер на побережье Бельгии; к ним приставлены два бельгийских телохранителя. В течение последующих нескольких месяцев Эйнштейн ненадолго выезжает в Англию и в Швейцарию, где в последний раз видит своего сына Эдуарда. Рудольф Кайзер организует перевозку бумаг Эйнштейна дипломатической почтой из Берлина во Францию;
- 21 апреля: отставка с поста члена Баварской академии наук;
- часть переписки Эйнштейна с Фрейдом опубликована в виде книги «Зачем воевать?»;
- 10 июня: Спенсеровская лекция в Оксфорде;
- 9 сентября Эйнштейн навсегда покидает Европейский континент и отправляется в Англию;

— 17 октября: с гостевыми визами Эйнштейн, его жена, Элен Дюкас и Майер приезжают в США и в тот же день отправляются в Принстон.

1935 г.

- краткая поездка на Бермуды, откуда Эйнштейн направляет официальную просьбу о предоставлении ему права постоянного проживания в США;
- награждение медалью Франклина.

1936 г.

- 7 сентября: смерть Марсея Гроссмана;
- 20 декабря: смерть Эльзы.

1939 г.

- в Принстон к брату приезжает Майя; в его доме она проведет остаток дней;
- 2 августа Эйнштейн посылает Ф.Д. Рузвельту письмо, в котором обращает его внимание на возможность использования атомной энергии в военных целях.

1940 г.

- 1 октября: судья Филипп Форман в Трентоне приводит к присяге как гражданина США Эйнштейна, но он сохраняет и швейцарское гражданство.

1943 г.

- Эйнштейн подписывает контракт (действовавший до 30 июня 1946 г.) о сотрудничестве в качестве консультанта научно-исследовательского отдела Бюро артиллерии ВМФ США (тема «Боеприпасы и взрывчатые вещества», подтема «ВВ большой силы и ракетное топливо») с окладом 25 долл. в день.

1943–1944 гг.

- Эйнштейн от руки переписывает статью 1905 г. о теории относительности, которая продается с аукциона в Канзас-сити за 6 млн долл. в рамках сбора средств на нужды военной промышленности. (Сейчас эта рукопись хранится в Библиотеке конгресса.)

1945 г.

- 10 декабря: выступление с речью в Нью-Йорке («Выиграна война, а не мир»).

1946 г.

- Эйнштейн дает согласие стать председателем Чрезвычайного комитета ученых-атомщиков;
- октябрь: открытое письмо Генеральной Ассамблее ООН, содержащее призыв создать мировое правительство.

1948 г.

- 4 августа: смерть Милевы в Цюрихе;
- декабрь: пробная лапоротомия показывает, что у Эйнштейна аневризма брюшной аорты.

1949 г.

- 13 января Эйнштейн выписывается из больницы;
- публикация «некролога» — статьи «Автобиографические заметки».

1950 г.

- 18 марта Эйнштейн подписывает и запечатывает свое последнее завещание. Единственным душеприказчиком назначается доктор О. Натан. Распорядителями имущества назначены совместно О. Натан и Э. Дюкас. По завещанию все письма и рукописи должны быть переданы на хранение в университет Хебрю. Свою скрипку Эйнштейн завещает внуку Бернарду Цезару.

1951 г.

- смерть Майи в Принстоне.

1952 г.

- ноябрь: Эйнштейн получает предложение занять пост президента Израиля и отклоняет его.

1954 г.

- 14 апреля: в прессе опубликовано заявление Эйнштейна, где он выражает поддержку Роберту Оппенгеймеру, против которого выдвигались обвинения в антиамериканской деятельности;
- последняя встреча Эйнштейна и Бора (в Принстоне);
- у Эйнштейна обнаруживают гемолитическую анемию.

1955 г.

- 15 марта: смерть Бессо;
- 11 апреля Эйнштейн подписывает последнее письмо (Бертрану Расселу), в котором соглашается поддержать призыв ко всем

странам отказаться от ядерного оружия. На той же неделе он пишет последнюю фразу в неоконченной рукописи: «Что касается бушующих повсюду политических страстей, то они требуют жертв»;

— 13 апреля: разрыв аневризмы аорты;

— 15 апреля Эйнштейна перевозят в принстонскую больницу;

— 17 апреля Эйнштейн звонит Элен Дюкас и просит принести ему письменные принадлежности и его последние выкладки;

— 18 апреля, 1 ч 15 мин ночи: смерть Эйнштейна. Тело кремировано в Трентоне в 16 ч. Пепел развеян Отто Натаном и Паулем Оппенгеймом в месте, которое сохранено в тайне;

— 21 ноября в Берне родился сын Бернарда Цезара, Томас Мартин — первый из правнуков Эйнштейна.

Содержание

Часть 1

| | |
|--|-----|
| Воспоминания, диалоги, споры | 5 |
| Мотивы научного исследования. Пролог | 6 |
| Автобиографические заметки | 12 |
| Автобиографические наброски | 49 |
| Эрнст Мах | 56 |
| Природа реальности. Беседа с Рабиндранатом Тагором | 63 |
| Истоки войн. Переписка между Альбертом Эйнштейном и Зигмундом Фрейдом | 67 |
| Сократовский диалог | 81 |
| Наука и Бог. Диалог | 88 |
| Физика и реальность | 93 |
| Принципы теоретической физики | 123 |
| Основы теоретической физики | 126 |

Часть 2

| | |
|--|-----|
| Парадоксальность физики. | 137 |
| Познание прошлого и будущего в квантовой механике | 138 |
| О соотношении неопределенностей | 141 |
| О методе теоретической физики | 142 |
| Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным? | 148 |
| Н. Бор. Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным | 156 |

Часть 3

| | |
|--|-----|
| Физики и физика | 169 |
| В. Гейзенберг. Теория относительности. Беседа с Эйнштейном | 170 |
| М. Борн. Статистические теории Эйнштейна | 193 |
| М. Борн. Воспоминания об Эйнштейне | 207 |

Приложения

Приложение 1.

Работы Эйнштейна по теории относительности

| | |
|--|-----|
| в популярном изложении | 225 |
| $E = mc^2$ настоящая проблема нашего времени | 226 |
| Относительность: сущность теории относительности | 230 |
| Относительность и проблема пространства | 237 |

Приложение 2.

| | |
|---|-----|
| Из редко публикуемых работ Эйнштейна | 253 |
| Теоретическая атомистика | 254 |
| Элементарная теория полета и волн на воде | 269 |
| Причины образования извилин в руслах рек и так называемый закон Бэра | 273 |

Приложение 3.

| | |
|--|-----|
| К биографии Эйнштейна | 277 |
| Основные даты жизни А. Эйнштейна | 278 |

Научно-популярное издание

Альберт Эйнштейн

Мир и физика

Сборник

Редактор Т. Репина
Художник П. Ефремов
Корректор Е. Андреева
Компьютерная верстка О. Капелькин, И. Патрашкова
Компьютерная подготовка текста С. Иванов

Лицензия ИД № 05504 от 1 августа 2001 г.

Подписано в печать 02.07.03. Формат 60×90¹/₁₆. Объем 18,5 п. л.
Печать офсетная. Гарнитура «Ньютон». Тираж 1000 экз. Заказ

ООО «Тайдекс Ко»
117311, Москва, ул. Строителей, д. 4, корп. 3

Отпечатано с готовых диапозитивов в ФГУП ордена «Знак Почета»
Смоленской областной типографии им. В.И. Смирнова.
214000, Смоленск, пр-т им. Ю. Гагарина, 2.





Родители А. Эйнштейна: Герман Эйнштейн (1847–1902)
и Паулина Кох (1858–1920)



Выпускники кантональной школы. Аарау, 1895



Альберт Эйнштейн — студент
Цюрихского политехникума. 1896



Марсель Гроссман (1878–1936)



«Семейное фото» физиков с мировыми именами.
Сольвеевский конгресс. 1927



Первая публикация
по СТО. 1905



Первая жена А. Эйнштейна Мелева Марич
и их сыновья Эдуард (слева) и Ганс Альберт. 1914



А. Эйнштейн
и его вторая жена Эльза. 1922



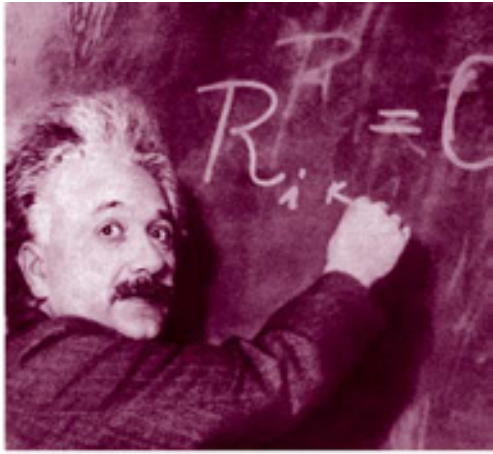
С Чарли Чаплином в Голливуде. 1931



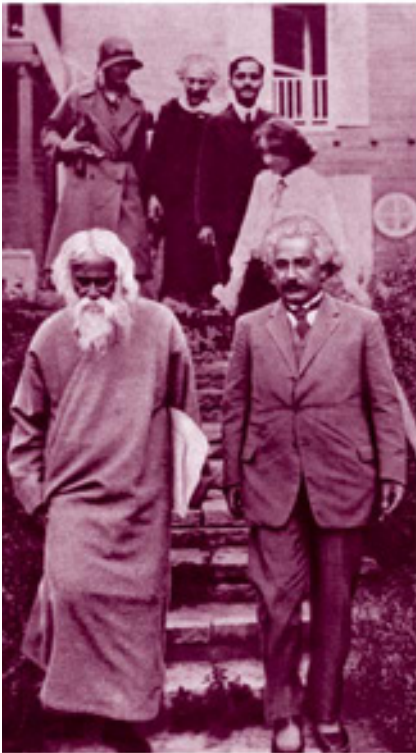
Берлин. 1916



Берлин, 1931



Принстон, 1932



Тагор и Эйнштейн
на даче в Капуре. 1930



Речь в защиту мира. 1945



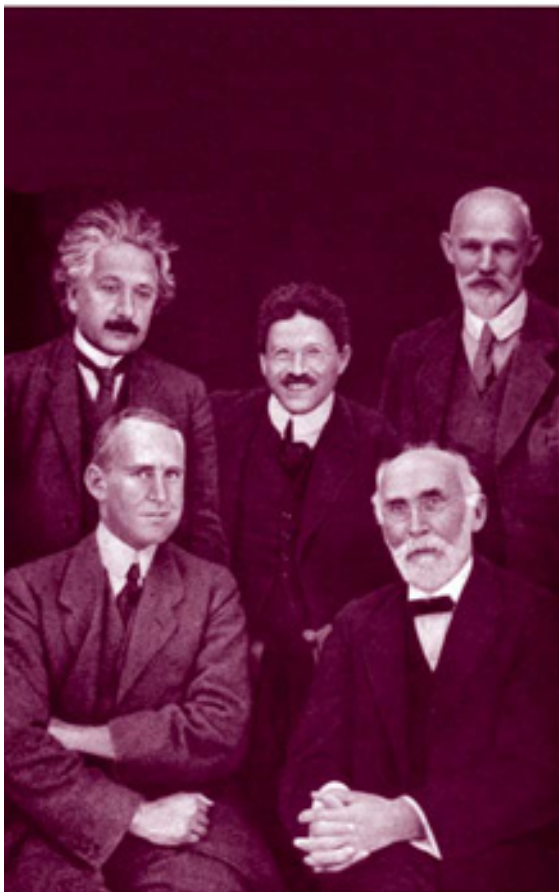
Георг Фридрих Риман
(1826–1866)



Джеймс Клерк
Максвелл (1831–1879)



Эрнст Мах
(1838–1916)



А. Эйнштейн, П. Эренфест, В. де Ситтер,
А. Эдингтон, Г. Лоренц. 1923



Людвиг Больцман
(1844–1906)



Герман Минковский
(1864–1909)



Макс Планк
(1858–1947)



Макс Борн
(1882–1970)



Нильс Хенрик Давид
Бор (1885–1962)



Эрвин Шрёдингер
(1887–1961)



Луи де Бройль
(1892–1987)



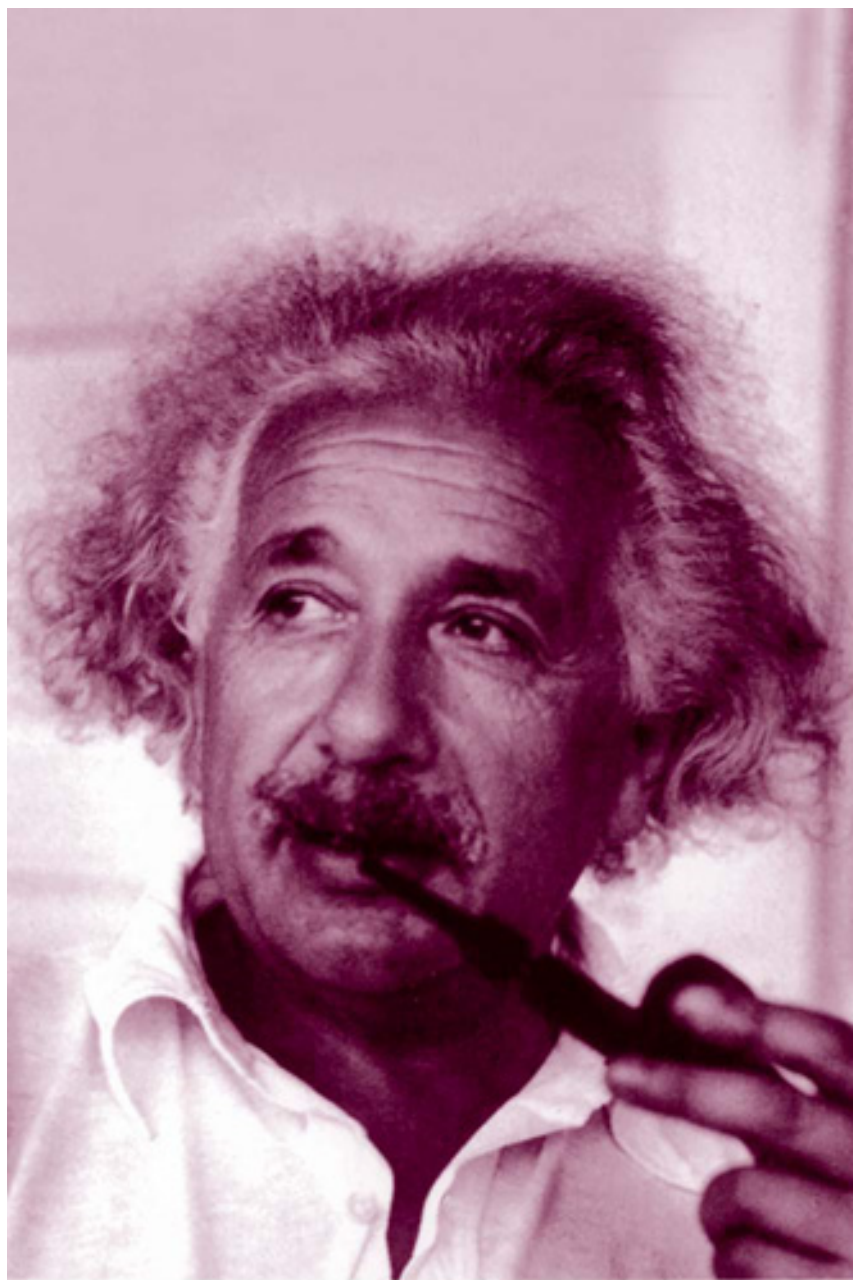
Вернер Гейзенберг
(1901–1976)



Роберт Оппенгеймер
(1904–1967)



С. Н. Бором, Дж. Франком и И. Раби. 1954



Альберт ЭЙНШТЕЙН

Вы находите удивительным, что я говорю
о познаваемости мира...

Ну что же,... успех этого предприятия
предполагает существенную упорядоченность
объективного мира,
ожидать которую априори
у нас нет никаких оснований.

В этом и состоит «чудо»,
и чем дальше развиваются наши знания,
тем волшебнее оно становится.

A. Einstein

Заказать книги серии «Грани мира»
можно по тел./факсу (095) 318-7721
или по адресу 117648, Москва, а/я 28.

E-mail: zakaz@ecolife.ru
Сайт в Интернете
<http://www.ecolife.ru>

ISBN 5-94702-013-0



9785947020137