

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## ТВОРЧЕСКАЯ АВТОБИОГРАФИЯ\*)

*Альберт Эйнштейн*

Вот я здесь сижу и пишу на 68 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, всё же стоить и изложить то, что этого заслуживает,—задача нелёгкая; когда человеку 67 лет, то он не тот, каким был в 50, 30 и 20 лет. Всякое воспоминание подкрашено тем, что есть человек сейчас, а нынешняя точка зрения может ввести в заблуждение. Это соображение могло бы отпугнуть. Но, с другой стороны, из собственных переживаний можно почерпнуть многое такое, что недоступно сознанию другого.

Ещё 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 гнуждался существованием своего желудка к участию в этой гонке. Участие это могло привести к удовлетворению желудка, но никак не к удовлетворению всего человека, как мыслящего и чувствующего существа. Выход отсюда указывался прежде всего религией, которая ведь насаждается всем детям традиционной машиной воспитания. Таким путём я, хотя и был сыном совсем нерелигиозных (еврейских) родителей,—пришёл к глубокой религиозности, которая, однако, уже в возрасте 12 лет резко обрвалась. Чтение научно-популярных книжек привело меня вскоре

---

\*) А. Einstein, „Autobiographisches“ (буквально: «Нечто автобиографическое»). Впервые опубликовано в сборнике „Albert Einstein, Philosopher-Scientist“, The Library of Living Philosophers, 1949, Illinois, USA. Перевод В. А. Фока и А. В. Лермонтовой.

к убеждению, что в библейских рассказах многое не может быть верным. Следствием этого было прямо-таки фанатическое свободомыслие, соединённое с выводами, что молодёжь 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, во вне, был этот 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 вне-личного 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 надёжной, и я никогда не жалел, что по ней пошёл.

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 её существа может выделяться ярче других её сторон и в большей степени определять её 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 атомную структуру. В развитии человека моего склада поворотная точка достигается тогда, когда главный интерес жизни понемногу отрывается от мгновенного и личного и всё больше и больше концентрируется в стремлении мысленно охватить природу вещей. С этой точки зрения вышеприведённые 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 ещё не значит «думать». Когда эти картины становятся в ряд, каждый член которого пробуждает следующий, то и это ещё не есть мышление. Но когда определённая 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 лишённые 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 соединялось 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 свободную игру с понятиями. Обоснование этой игры заключается в достижимой при помощи неё возможности обозреть чувственные восприятия. Понятие «истины» к такому образованию ещё совсем неприменимо; 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 (Erlebnis)? Этот «акт удивления», повидимому, 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 в известном смысле преодоление чувства удивления — непрерывное бегство от «удивительного», от «чуда»\*).

Чудо такого рода я испытал ребенком 4 или 5 лет, когда мой отец показал мне компас. То, что эта стрелка вела себя так определённо, никак не подходило к тому роду явлений, которые могли найти себе место в моём неосознанном мире понятий (действие через прикосновение). Я помню ещё и сейчас — или мне кажется, что я помню — что этот случай произвёл на меня глубокое и длительное впечатление. За вещами должно быть что-то ещё, глубоко скрытое..

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

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 ещё 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 трёх 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 произвела 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 ещё 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 казалась, 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 — твёрдый стержень и т. п.). Возможно, что это понимание лежит в основе известной кантовской постановки вопроса относительно возможности «синтетического суждения a priori».

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

Раз я позволил себе прервать начатый с грехом пополам некролог, я уж не буду стесняться выразить здесь в нескольких фразах своё 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 твёрдым 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 надёжности, с которой можно провести эту связь или интуитивное сопоставление, и ничем иным. Система понятий есть творение человека, как и правила синтаксиса, определяющие её структуру. Хотя системы понятий сами по себе логически совершенно произвольны, но их связывает то, что они, во-первых, должны допускать возможно надёжное (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 даётся определений, и таких предложений, для которых не даётся доказательств.

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

Замечание к историческому развитию. Юм (Hume) ясно понял, что некоторые понятия, например понятие причинности, не могут быть выведены из опытных данных логическим путём. Кант, убеждённый в том, что без некоторых понятий обойтись нельзя, считал эти понятия в их принятой форме необходимыми предпосылками всякого мышления и стлчал их от понятий эмпирического происхождения. Я же уверен, что это разграничение ошибочно и не охватывает естественным образом задачу. Все понятия, даже и ближайšie к ощущениям и переживаниям, являются с логической точки зрения произвольными положениями, точно так же как и понятие причинности, о котором в первую очередь и 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. Всё это занятие было поистине увлекательно; в нём были взлёты, 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 естественно-научные 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, Гурвич, Минковский), так что, собственно говоря, я мог бы получить солидное математическое образование. Я же большую часть времени работал в физической лаборатории, увлечённый 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 естественно-научных 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 учёности, без которой ещё можно обойтись. Кроме того, и интерес к исследованию природы, несомненно, был сильнее; мне, как студенту, не было ещё ясно, что доступ к более глубокому 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 выскивать то, что может повести в глубину и отбрасывать всё остальное, всё 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 такого 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 при-

нимал как неизбежное, притом значительно меньшее зло. В сущности почти чудо, что современные методы обучения ещё не совсем удушили святую любознательность, ибо это нежное растение требует наряду с поощрением прежде всего свободы, — без неё 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 не 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 таковое было) бог создал Ньютоновы законы движения вместе с необходимыми массами и силами. Этим всё и исчерпывается; остальное должно получиться дедуктивным путём, 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 квазитвёрдого упругого эфира, и прежде всего кинетическая теория газов. Здесь следует упомянуть независимость теплоёмкости одноатомных газов от атомного веса, вывод уравнения состояния газа и его связь с теплоёмкостью, 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 твёрдо 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 своём сознательном мышлении также считали механику надёжной 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 же местах, где конструктивно-спекулятивный характер её 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 её к фактам при помощи более или менее искусственных дополнительных предположений. Во всяком случае, в этом первом критерии речь идёт о проверке теоретической основы на имеющемся опытном материале.

Во втором критерии речь идёт 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 идёт 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 а priori качества систем (т. е. содержит наиболее определённые 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 её «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 определённую моих утверждений в двух последних абзацах я не буду оправдывать недостатком отведённого мне в печати места; я прямо признаю, что так сразу я не могу, а может быть и вообще не в состоянии, заменить эти намёки точными определениями. Однако я считаю, что более точная формулировка возможна. Во всяком случае, мы видим, что между «авгурами» большею 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 серьёзные 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 твёрдому телу, однако она должна быть несжимаемой, чтобы продольные волны не существовали. 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 серьёзно и не пробовал.

Далее, электромагнитные силы заставили вести электрические массы, которые хотя и не обладали заметной инертностью, но 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, её подтвердившими, показала, что существуют электромагнитные процессы, по существу своему отсранные 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 всё 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 стороны — непрерывное поле. Это состояние физики, в котором отсутствует единая её основа, является как бы переходным; при всей его неудовлетворительности оно далеко ещё 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 всё 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 «жёсткие» системы отсчёта являются в логическом отношении равноправными. Однако уравнения механики (и уже первый закон Ньютона) справедливы лишь в некоторых из этих систем отсчёта, а именно в «инерциальных» системах, составляющих особый класс. При этом характер системы отсчёта, как материального тела, оказывается несущественным. Необходимость брать именно инерциальную систему отсчёта должна быть поэтому обусловлена чем-то лежащим вне тех предметов (масс, расстояний), о которых идёт речь в теории. В качестве такого определяющего обстоятельства Ньютон ввёл «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 инерциальных систем, движущихся друг относительно друга равномерно и без вращения, причём эти системы отсчёта предполагаются выделенными среди всех остальных жёстких систем отсчёта.

По мнению Маха, в действительности 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 всё 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 звёзды. 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 жёсткими координатными системами.

Приведём 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 ещё 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 не очевидное само по себе требование, чтобы силы зависели только от самих координат (а, 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  $\left(\frac{1}{r}\right)$ . Дополнительное замечание: уже давно известно, что эта функция является

центрально-симметрическим решением простейшего (инвариантного по отношению к вращениям) дифференциального уравнения  $\Delta\varphi = 0$ ; 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 счёл 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 нашёл единственный путь, возможный в твоё время для человека величайшей научной творческой способности и силы мысли. Понятия, созданные тобой, и сейчас ещё 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 удивлённый 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 её предпосылки, чем разнообразнее предметы, которые она связывает, и чем шире область её применения. Отсюда глубокое впечатление, которое произвела на меня классическая термодинамика. Это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убеждён, что в рамках применимости её 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, — всё 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 дейст-

вием; 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 свойством 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 произвёл 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 создаётся положением и скоростью точечных зарядов, сидящих на частицах. Диэлектрические свойства, проводимость и т. п. обусловлены исключительно характером механических связей между частицами, из которых состоит 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, описываемым также и излучение. Тяготение большей частью в расчёт не принимается вследствие его относительной малости; однако оно может быть учтено путём обогащения структуры поля и соответственного расширения максвелловских уравнений для поля. Физик нынешнего поколения сочтёт завоёванную Лоренцем точку зрения единственно возможной, а в то время это был поразительно смелый шаг, без которого дальнейшего развитие было бы невозможно.

Если посмотреть на эту фазу развития теории критически, то прежде всего бросается в глаза её 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 имелась 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 ещё не было метода, который бы позволил находить такие уравнения, не вдаваясь в самый авантюрный произвол. Во всяком случае, можно было надеяться найти новую, надёжную 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 ещё 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 неё, по крайней мере в её начальной стадии, не влияли никакие из ряда вон выходящие открытия экспериментального характера.

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

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

где  $f(\nu/T)$  означает универсальную функцию единственной переменной  $\nu/T$ . 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 квант. Эта формула выглядит благодаря своему знаменателю несколько странно. Допускает ли она теоретическое обоснование? Планк действительно нашёл 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 предпочёл 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  $\nu$ ) формула давала выражение

$$E = kT.$$

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

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

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 даёт истинную величину атома. Численное значение удовлетворительно совпадало 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 её 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 пришёл к этому выводу, то он, может быть, не сделал бы своего великого открытия, потому что у его рассуждения исчезло бы самое основание.

Вернёмся к рассуждению Планка. На основании кинетической теории газов, Больцман нашёл, 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, определённое 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 ещё и потому, что применимость её 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  $\nu$ . Макроскопическое состояние задано полной энергией колебания всех резонаторов; микросостояние 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  $\epsilon$  и задал вопрос: сколькими способами можно распределить между резонаторами эти элементы энергии. Логарифм этого числа даёт тогда энтропию, а с нею (термодинамическим путём) и температуру системы. Планк получил свою формулу, взяв для элементов энергии  $\epsilon$  величину  $\epsilon = h\nu$ . Решающим является здесь то обстоятельство, что результат получается только, если брать для  $\epsilon$  определённое конечное значение и, значит, не переходить к пределу  $\epsilon = 0$ . Такая форма рассуждения заглушивает то, что оно противоречит механической и электродинамической основе, на которую опирается вывод во всём 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 даёт важные средние значения, явствует хотя бы из того, что основанные на нём законы Стефана — Больцмана и Вина согласуются с опытом.

Всё 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 ведёт этот закон теплового излучения как для фотоэлектрического эффекта и других родственных ему явлений, связанных с превращениями лучистой энергии, так и для теплоёмкости тел, в частности твёрдых 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 твёрдой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточным, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьём — 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 надёжнее устанавливали бы существование атомов определённой 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, причём величина смещений наперёд 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 учёных против атомной теории можно несомненно отнести за счёт их позитивистской философской установки. Это — интересный пример того, как философские предубеждения мешают правильной интерпретации фактов даже учёным со смелым мышлением и с 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 не легко 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 даёт надёжные результаты тогда, когда её применяют к движениям, для которых можно пренебречь высшими производными по времени от скорости. На признании этого факта можно построить сравнительно прямой 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 флуктуаций, 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 флуктуаций 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, причём эти кванты отражаются целиком, не раздробляясь. Приведённое 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 (причём 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 г., 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 путём 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 надёжным результатам. Образцом представлялась мне термодинамика. Там общий принцип был дан в предложении: законы природы таковы, что построить *perpetuum mobile* (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, перемещенное 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 всё 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 частной 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 её 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 жёсткого тела отсчёта (система отсчёта), которое, к тому же, должно находиться в более или менее определённом состоянии движения (инерциальная система). При заданной инерциальной системе координаты означали результаты определённых измерений жёсткими (неподвижными) стержнями. (Следует постоянно иметь в виду, что предположение о том, что жёсткие 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 (таковым является идущий детерминированным образом периодический процесс, осуществляемый системой достаточно малых пространственных размеров). Часы, закреплённые неподвижно относительно инерциальной системы, определяют местное время. Совокупность местных времён всех пространственных точек составляет «время», относящееся к выбранной инерциальной системе, если, кроме того, дан способ «сверить» все эти часы между собой. Очевидно, что *a priori* совсем не обязательно, чтобы определённые 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 твёрдого стержня, представляет 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 нижеследующие два положения:

- 1) постоянство скорости света,
- 2) независимость законов (значит, в частности, и закона постоянства скорости света) от выбора инерциальной системы (частный принцип относительности), несовместны между собой (хотя каждое в отдельности подтверждается опытом).

В основе частной теории относительности лежит признание того, что положения 1) и 2) между собой совместны, если для пересчёта координат и времени 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 определённые гипотезы о действительном поведении движущихся масштабов и часов — гипотезы, которые могут быть подтверждены или же опровергнуты на опыте.

Общий принцип частной 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 *perpetuum mobile*.

Скажем сперва несколько слов об отношении теории к «четырёхмерному пространству». Весьма распространённой ошибкой является мнение, будто частная теория относительности как бы открыла, или же вновь ввела, четырёхмерность физического многообразия (континуума). Конечно это не так. Четырёхмерное многообразие пространства и времени лежит в основе также и классической механики. Только в четырёхмерном континууме классической физики «сечения», соответствующие постоянному значению времени, обладают абсолютной (т. е. не зависящей от выбора системы отсчёта) реальностью. Тем самым четырёхмерный континуум естественно распадается на трёхмерный и на одномерный (время), так что четырёхмерное рассмотрение не навязывается как необходимое. Частная же теория относительности, наоборот, создаёт 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 четырёхмерное тензорное исчисление, Минковский дал для четырёхмерного пространства то, что даёт обыкновенное векторное исчисление для трёх пространственных измерений. Он также показал, что преобразование Лоренца является не чем иным, как поворотом координатной системы в четырёхмерном 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 четырёхмерного пространства) два рода физических предметов, а именно: 1) масштабы и часы, 2) всё 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 её независимой от них. Обычный образ действия имеет, однако, своё 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 неё 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 частной теории относительности.

1) Одновременности отдалённых событий не существует; значит, нет и непосредственно 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 её энергией, так что масса перестаёт быть самостоятельным понятием.

Замечание. Скорость света  $c$  является одной из величин, входящих в физические уравнения в качестве «универсальной по-

стоянной». 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 чём другом, кроме веры в простоту и понятность природы. Предложение это — следующее: таких произвольных постоянных не существует. Иначе говоря, природа устроена так, что её законы в большей 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).

Частная теория относительности обязана своим возникновением уравнениям Максвелла для электромагнитного поля. И обратно, только частная теория относительности даёт уравнениям Максвелла удовлетворительное формальное толкование. Уравнения Максвелла представляют простейшие инвариантные относительно преобразования Лоренца уравнения поля, которые только можно написать для кососимметричного тензора, связанного с векторным полем. Всё это было бы хорошо, если бы мы не знали из квантовых явлений, что теория Максвелла не передаёт энергетических свойств излучения. Но для решения вопроса о том, как именно следует видоизменить теорию Максвелла (причём видоизменение должно быть естественным), частная теория относительности не даёт достаточных указаний. И на вопрос Маха «почему инерциальные системы физически выделены относительно других систем отсчёта?» эта теория тоже не даёт ответа.

Тот факт, что частная 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 ещё 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 тяжёлая масса тела в точности равна его инертной массе.

Из 1) и 2) следовало, что вес системы зависит вполне определённым и известным образом от её полной энергии. Если теория этого не давала или давала только с натяжкой, то её 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 надлежащим образом, во всяком случае без натяжки. Это убедило меня в том, что в рамках частной 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 протяжённости) всё происходит так, как в пространстве без тяготения, если в нём вместо «инерциальной» системы отсчёта ввести систему, ускоренную относительно неё.

Значит, если считать, что поведение тел в ускоренной системе отсчёта обусловлено как бы «истинным» полем тяготения (а не только кажущимся), то эту систему отсчёта 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» теряет тогда всякий смысл, а с ним и принцип инерции, причём исчезает также парадокс Маха.

Таким образом, равенство инертной и весомой массы приводит вполне естественно к мысли о том, что основное требование частной теории относительности (инвариантность законов по отношению к преобразованию Лоренца) слишком узко, т. е. что нужно



постулировать инвариантность законов и относительно нелинейных преобразований координат в четырёхмерном континууме.

Это произошло в 1908 г. Почему понадобилось ещё 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 следующим образом.

Мы исходим из пустого пространства без поля, в том виде, как оно рассматривается — в инерциальной системе отсчёта — в частной теории относительности. Это есть простейший физически возможный случай. Вообразим себе теперь неинерциальную систему, введённую так, что она движется относительно инерциальной системы в одном направлении (в трёхмерном смысле) с постоянным ускорением (соответственно определённым). По отношению к этой системе возникнет статическое параллельное поле тяготения. При этом систему отсчёта можно взять жёсткую с трёхмерной 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 непосредственное метрическое значение координат теряется, если вообще допускать нелинейные преобразования координат. Но делать это необходимо, если стремиться к тому, чтобы равенство тяжёлой 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 путём 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 частной теории относительности; эта последняя группа является подгруппой первой группы.

Само по себе это требование ещё не может, конечно, служить достаточно определённой 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 чём: 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 ещё ответить с уверенностью. Путь, по которому я пошёл при первой формулировке общей теории относительности, может быть характеризован 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 частной теории относительности. Такое пространство характеризуется тем, что в надлежаще выбранной системе координат относящейся 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. Отнесённая 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 (полям) (1) получаются  $g_{ik}$  с исчезающими 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 линия). 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 ступени 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 всё ещё 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 представляет 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

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

получаемые из предыдущих однократным свёртыванием. Только эти уравнения и могли рассматриваться как уравнения поля в случае а). Далее, естественно считать, что и в случае а) геодезическая линия попрежнему даёт 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 неё не отважился. Я предпочёл 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  $\varphi$  — потенциал тяготения), которое должно выполняться в таких местах, где плотность  $\rho$  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  $\rho$  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 уравнениям 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 её расходимость в смысле абсолютного дифференциального исчисления тождественно равна нулю. Правая часть включает в себя всё 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 (*Gesamtfeld*) ещё 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 частной 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 всё-таки мы бы не достигли той степени познания, какую даёт 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.

Ещё одно общее замечание о структуре поля и группе. Ясно, что, вообще говоря, теория представляется нам тем совершеннее, чем проще положенная в её 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 частной 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 линия). 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 путём интегрирования уравнений поля вычислить поле, соответствующее двум неподвижным материальным точкам, то оно будет иметь, помимо особенностей в материальных точках, также и особенную линию, соединяющую материальные точки между собой. Но можно задать движение материальных точек так, чтобы определяемое ими поле тяготения вне материальных

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

точек нигде не имело особенностей. Это будут как раз те движения, которые в 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 (Шредингер, 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 стороны, 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, как я об этом думаю.

Физика есть стремление осознать сущее как что-то 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  $\psi$  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  $\psi$  (в определённый момент времени) выражает следующее: какова вероятность того, что определённая физическая величина  $q$  (или  $p$ ) окажется в определённом заданном интервале, если я буду её измерять в момент  $t$ ? Здесь вероятность должна рассматриваться как величина, доступная опытному определению, т. е. как величина безусловно «реальная». Определить её я смогу, если я очень много раз буду создавать ту же самую функцию  $\psi$  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 определённого ответа, потому что ведь измерение есть процесс, означающий конечное внешнее вмешательство в систему; поэтому можно себе представить, что система получает определённое (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  $\psi$ .

$A$ . Отдельная система обладает (до измерения) определённым 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  $\psi$  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) определённым значением  $q$  (или  $p$ ). Измеренное значение возникает только благодаря акту измерения, с соответствующей этому значению вероятностью, получаемой из функции  $\psi$ . Исходя из этого понимания, он объявит (или по крайней мере имеет право объявить): функция  $\psi$  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  $\psi_{12}$ . Все квантисты согласны между собой в следующем. Если я произведу полное измерение над  $S_1$ , то из результатов измерения и из  $\psi_{12}$  я получу вполне определённую волновую функцию  $\psi_2$  системы  $S_2$ . При этом характер  $\psi_2$  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 наперёд ещё меньше, чем о системе, описанной волновой функцией. Но одно предполо-

жение представляется мне бесспорным. Реальное положение вещей (состояние) системы  $S_2$  не зависит от того, что проделывают с пространственно отделённой от неё системой  $S_1$ . Но в зависимости от того, какого рода измерение я произвожу над  $S_1$ , я получаю для второй подсистемы разные  $\psi_2$  ( $\psi_2, \psi_2^1, \dots$ ). 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  $\psi_2$  (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 отделённые 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  $\psi$  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.

Моё 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. Они 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 путём 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 особенностей) во всём четырёхмерном пространстве. Но прежде всего они считают, что, видимо, скачкообразный характер элементарных процессов может быть отображён только теорией, являющейся по существу статистической; в такой теории скачкообразные изменения систем должны учитываться



путём 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 дают, по моему мнению, больше надежды на получение чего-либо точного, чем все остальные уравнения физики. Возьмём 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 путём нахождения логически простого математического условия, определяющего вполне или почти вполне вид этих уравнений. Но когда такие достаточно жёсткие формальные условия уже установлены, то для построения теории требуется совсем немного фактических данных. В случае уравнений тяготения такими формальными условиями являются: наличие четырёх 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 жёстко 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 привёл от частной относительности к общей относительности. Я пробовал, в частности, привлечь сюда группу комплексных преобразований координат. Все такие попытки были безуспешны. Я откасался также и от явного или скрытого увеличения числа измерений

пространства. Это направление было намечено Калуцой, и оно ещё и сейчас имеет своих сторонников (в своём проективном варианте). Мы ограничиваемся четырёхмерным пространством и группой непрерывных вещественных преобразований координат. После многих лет тщетных поисков я считаю логически наиболее удовлетворительным решение, набросок которого даётся 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

$$g_{ik}g^{il} = \delta_k^l \quad (\delta_k^l \text{ — тензор Кронекера}).$$

Образованные таким путём 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  $\Gamma_{ik}^l$ , геометрический смысл которого состоит в том, что оно определяет параллельный перенос вектора. Аналогично, для несимметричных  $g_{ik}$  можно определить несимметричные  $\Gamma_{ik}^l$  по формуле

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

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  $\Gamma$ .

Как и в вещественной теории, из  $\Gamma$  можно образовать кривизну  $R_{iklm}$  и из неё, путём свёртывания, кривизну  $R_{kl}$ . Наконец,

пользуясь некоторым вариационным принципом и соотношениями (А), можно найти совместные между собой уравнения поля:

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

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

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

$$R_{kl,m} + R_{lm,k} + R_{mk,l} = 0. \quad (C_2)$$

При этом каждое из уравнений (B<sub>1</sub>), (B<sub>2</sub>) является следствием другого, если выполнено (А). Символ  $R_{kl}$  означает симметричную, а символ  $R_{kl}$  антисимметричную часть величины  $R_{ik}$ .

В случае равенства нулю антисимметричной части  $g_{ik}$  эти формулы приводятся к (А) и (C<sub>1</sub>). Это будет случай чистого поля тяготения.

Мне кажется, что эти формулы представляют 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 всём пространстве?

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

---

\*) 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.