

довольно близко к истинам, составляющим предмет специальной теории относительности». Эйнштейн ответил на это: «Да, это верно, но по отношению к общей теории относительности дело обстоит иначе. Я сомневаюсь, была бы она известна теперь».

Общая теория относительности выросла на базе специальной. Желая дать обзор исторического развития теории относительности за последние 50 лет, мы должны посвятить общей теории относительности несколько больше времени, чем специальной, так как о последней трудно сказать что-либо такое, что не знал бы каждый физик-теоретик, а возможно, и экспериментатор. С другой стороны, общая теория относительности пользуется меньшей известностью; можно заниматься физикой, не зная её. Некоторые физики пытаются опровергнуть общую теорию относительности, представляя её как формальную теорию, мало связанную с экспериментом. Известные три подтверждения общей теории относительности, по мнению некоторых физиков, сомнительны, а факты, связанные с ними, — не интересны!

Я один из тех физиков, кто считает такие суждения несостоятельными, кто верит, что общая теория относительности решает проблему тяготения, что она является замечательным примером нелинейной теории поля и что её влияние на другие области физики будет всё время расти. Я, однако, не думаю, чтобы на основе этой теории удалось понять структуру элементарных частиц.

После этих предварительных замечаний я позволю себе начать свой краткий обзор исторического развития теории относительности. Этот обзор не будет ни полным ни объективным. Сам предмет не допускает объективности, а время, отведённое мне для доклада, — полноты.

В семнадцатом томе журнала *Annalen der Physik*, вышедшем в 1905 г., 30 страниц занимает статья Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел». Название статьи очень скромное, однако при чтении мы сразу замечаем, что эта работа отличается от других аналогичных работ. Она не содержит ссылок на литературу, не цитируются авторитеты, а отдельные сноски носят лишь пояснительный характер. Работа написана простым языком, и большая её часть может быть понята без глубокого знания предмета. Можно только удивляться, что эта работа, отличающаяся так резко по своей форме от обычных научных работ, была пропущена рефериентом (если таковой вообще существовал). Это удивительно тем более, что для полного понимания этой статьи требуется такая глубина мысли, которая ценнее и реже встречается, чем педагогическое знание. Метод изложения и сам стиль работы сохранил свою свежесть ещё и сегодня. Она до сих пор является лучшим пособием для изучения теории относительности. Автор этой работы не принадлежал к научным кругам, он не был даже преподавателем высшей школы. В то время, 50 лет тому назад, будучи молодым

доктором философии, 26-ти лет от роду, он служил в Швейцарском патентном ведомстве в Берне.

Во втором разделе этой работы сказано:

1. «Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, находящихся относительно друг друга в равномерном поступательном движении, эти изменения состояния относятся.

2. Каждый луч света движется в «покоящейся» системе координат с определённой скоростью c , независимо от того, испускается ли этот луч света покоящимся или движущимся телом».

Из этих двух постулатов — принципа относительности Галилея и принципа постоянства скорости света, как известно, следуют преобразования Лорентца. Они являются тем фундаментом, на котором была воздвигнута специальная теория относительности. Они являются теми предположениями, которые привели к радикальному переосмотру наших понятий о пространстве и времени.

В следующем томе журнала *Annalen der Physik* появилась маленькая работа Эйнштейна под названием «Зависит ли инерция тела от количества заключённой в нём энергии?» Если бы я охарактеризовал высказанные в этой работе идеи как потрясшие мир, то это не было бы преувеличением. Действительно, в этой работе мы впервые находим теоретическое указание на возможность нового явления, открывшего перед наукой и техникой неограниченные перспективы. В этой короткой статье утверждается: применение атомной энергии в принципе возможно. Сорок лет спустя было доказано, что возможно применение атомной энергии в военных целях. Это доказательство было столь явным как разрушение Хиросимы и Нагасаки, как внезапная смерть двухсот тысяч людей. Спустя примерно пятьдесят лет была доказана также возможность использования атомной энергии на благо человечеству. Горькая ирония сокрыта в том, что семя обоих возможных применений атомной энергии было посеяно самым миролюбивым человеком мира, одиноким человеком, ненавидевшим насилие и презиравшим грубую силу. Горькая ирония сокрыта в том, что за 10 лет до создания первой маленькой атомной электростанции в Советском Союзе разрушительная сила атомной энергии уничтожила два города и множество человеческих жизней. В конце короткой статьи Эйнштейна мы находим следующие строки:

«Масса тела есть мера содержания энергии в этом теле; если энергия изменяется на величину L , то масса изменяется в том же направлении на величину $\frac{L}{9 \cdot 10^{20}}$, причём энергия измеряется в эргах, а масса — в граммах.

Не исключена возможность того, что проверка теории может удасться для тел, у которых содержание энергии в высшей степени изменчиво (например, у солей радия)».

Какое же влияние оказали эти две работы? Вначале — почти никакого. В наше время важные работы распознаются быстрее, а работы, совершающие переворот в науке, часто влекут за собой целый поток изысканий в той же области. Правда, история наук нашего века знает и противоречащие этому примеры, как, например, двухлетнее затишье после первых работ де Бройля. Аналогичным образом были встречены и работы Эйнштейна. Целый поток работ по теории относительности появляется только спустя примерно четыре года, т. е. к 1909 г. Этот, несомненно, большой срок, потребовался физикам, чтобы воспринять одну из наиболее важных среди когда-либо опубликованных статей.

И всё же, как я знаю, некоторые физики и в этот период очень тщательно читали работу Эйнштейна и увидели в ней рождение бесконечно прозорливой мысли. Мой друг, профессор Лория в Польше, рассказывал мне, как его учитель, профессор Витковский из Кракова, чрезвычайно образованный физик с тонким вкусом, восторженно заметил ему после прочтения работ Эйнштейна: «Читайте работы Эйнштейна! Родился новый Коперник!»

Только в 1909 г. большее число физиков обратило внимание на результаты, полученные Эйнштейном. Более широкому ознакомлению с теорией относительности способствовал, в частности, доклад Минковского «Пространство и время», прочитанный им в 1908 г. на восьмидесятом съезде Общества немецких естествоиспытателей и врачей. Этот знаменитый доклад Минковского был, вероятно, его последним публичным выступлением, так как вскоре, к сожалению очень рано, он скончался. Минковский начал свой доклад словами, которые явились пророческим предсказанием того глубокого влияния, которое мыслям Эйнштейна суждено было оказать на современное мышление:

«Господа! Воззрение на пространство и время, которые я намерен перед вами развить, возникли на экспериментально-физической основе. В этом их сила. Их тенденция радикальна. Отныне пространство само по себе и время само по себе должны обратиться в фикции, и лишь некоторый вид соединения обоих должен ещё сохранить самостоятельность».

Математический гений Минковского облёк мысли Эйнштейна в новую геометрическую форму, которая в законченном виде выявила всю их красоту и простоту. С момента опубликования работ Минковского мы знаем, что все законы природы могут быть представлены в векторной или тензорной форме, причём векторы и тензоры являются некоторыми образованиями в четырёхмерном пространственно-временном многообразии. В дальнейшем пришлось добавить к векторам и тензорам ещё и спиноры. С исторической точки зрения дальнейшее развитие специальной теории относительности связано с развитием общей теории относительности. Так как мы, однако, не намерены рассматривать в данном изложении обе

теории совместно, то я хотел бы сказать ещё только несколько слов о специальной теории относительности, чтобы иметь затем возможность перейти непосредственно к общей теории.

Дальнейшее развитие специальной теории относительности явилось триумфальным шествием нашего познания. Мне хотелось бы в связи с этим указать только на три явления, представляющих собой блестящее подтверждение специальной теории относительности, а именно: на зависимость массы от скорости, на изящные опыты Айвса по изменению ритма движущихся часов и на зависимость времени жизни мезона от его скорости. Эти опыты, как и многие другие, подтверждают специальную теорию относительности; в то же время нет ни одного опыта, который бы противоречил ей.

Два наибольших триумфа нашего века в предсказании определённых явлений природы тесно связаны с историей развития специальной теории относительности. Я имею в виду волны де Бройля и теорию позитрона. Существует внутренняя связь между предсказанием существования волн де Бройля и преобразованиями Лорентца, между теорией позитрона и релятивистской формой уравнения Дирака для электрона.

Мне хотелось бы упомянуть здесь ещё об одном явлении, которое вам, по всей вероятности, неизвестно, так как работа по этому вопросу полностью ещё не опубликована. Один из молодых польских физиков, Верле, показал, что с помощью релятивистских уравнений движения нуклона может быть объяснено взаимное отклонение нуклонов при их схождении на очень небольшое расстояние, если только считать мезонное поле не векторным, а скалярным или псевдоскалярным. Мы имеем здесь дело с чисто релятивистским эффектом. Предположение Ястрова и Леви может быть, следовательно, выведено из уравнений мезонного поля.

Оставим теперь специальную теорию относительности и перейдём к общей.

С пятнадцати- или шестнадцатилетнего возраста Эйнштейн, как он неоднократно рассказывал мне, задумывался над следующими двумя вопросами:

1. Что случится, если кто-нибудь побежит за световым лучом и попытается поймать его?

2. Что случится, если кто-нибудь окажется в свободно падающем лифте?

Из ответа на первый вопрос выросла специальная теория относительности, из ответа на второй — общая.

Идеи специальной теории относительности носились в воздухе. Противоречия, устранённые ею, были хорошо известны физикам. Пуанкаре почти подшёлся в 1904 г. к формулировке специальной теории относительности. Раны на теле физики были видны многим. Иначе, однако, обстояло дело с общей теорией относительности.

Эйнштейн был единственным человеком, который всё ещё видел трудности и работал над их устранением. Общая теория относительности была как бы лекарством от серьёзной болезни, которую никто, кроме Эйнштейна, не замечал. Даже Планк говорил Эйнштейну: «Всё теперь так хорошо объяснено, зачем Вы занимаетесь этими другими проблемами?» Но Эйнштейн совсем один продолжал ими заниматься. Восемь лет отделяют специальную теорию относительности от общей, восемь лет постоянного мышления, принесшие в конце концов свои плоды в виде нового решения великой проблемы тяготения.

1907
1908
Первая работа, в которой Эйнштейн берётся за решение проблемы тяготения, появилась в 1911 году в журнале *Annalen der Physik* и носит название «О влиянии силы тяжести на распространение света». Это очень интересная работа. В ней содержатся мысли Эйнштейна, которые частично неправильны. В ней содержатся полупричины, догадки, расплывчатая уверенность, что истинное решение проблемы хоть и близко, но всё же совсем иное. Эта работа явилась первым проблеском света в процессе преодоления полного мрака. Одновременно с этим она показывает пристрастие Эйнштейна к мысленным экспериментам и его ребяческую способность удивляться простым вещам — вещам, которые кажутся такими простыми и знакомыми, что другие их совершенно не замечают.

Со времён Галилея физики знали, что все тела совершают падение с одинаковым ускорением. В наш век никто, за исключением Эйнштейна, не удивлялся больше этому закону. Опыт показал, что закон строго выполняется; этой фразой, как полагали, проблема была исчерпана.

Наша способность удивляться подавляется преподаванием. Только гений может противостоять этому. За последние три столетия развития науки Эйнштейн был первым, кто увидел в равенстве ускорений некий важный намёк. Ведь мы можем представить себе мир, в котором этот закон не выполняется, мир, в котором слоны падают так медленно, что кажутся парящими в воздухе, тогда как грудные младенцы устремляются к земле с опасным ускорением. Но в поле тяготения нашей планеты как грудные младенцы, так и слоны падают с одинаковым ускорением. Что означает это важное указание на равенство инертной и гравитационной массы? В рамках классической механики это равенство кажется чистой случайностью.

Я уже упоминал, что образ падающего в лифте человека, составлявший ещё в мальчишеском возрасте предмет размышлений Эйнштейна, привёл его спустя несколько лет к кругу идей общей теории относительности. Этот образ содержится также в рассматриваемой нами работе Эйнштейна; на этом примере с падающим лифтом была показана необходимость отклонения света в гравитационном поле! Правда, рассчитанное на этом основании численное

значение отклонения света оказалось слишком малым. Эйнштейн ещё не владел общей теорией относительности полностью. Этого он достиг только спустя четыре года, когда, возвращаясь к своим вычислениям, он исправляет их. Предсказание этого эффекта содержится однако уже в работе Эйнштейна, опубликованной в 1911 г. Он закончил её следующими знаменательными словами:

«Было бы крайне желательно, чтобы астрономы заинтересовались поставленным здесь вопросом даже и в том случае, если бы предыдущие рассуждения казались недостаточно обоснованными или рискованными. Ибо, отвлекаясь от всякой теории, нужно спросить себя, можно ли вообще современными средствами установить влияние гравитационных полей на распространение света».

Прошло восемь лет, пока был получен ответ на вопрос, поставленный Эйнштейном. За это время он переселился из Праги в Цюрих, а затем из Цюриха в Берлин. Здесь Эйнштейна застаёт начало первой мировой войны; здесь же он заканчивает свою работу над общей теорией относительности.

Признание теории относительности медленно распространялось от физиков-теоретиков к физикам-экспериментаторам, астрономам, математикам и философам. Она рассматривалась как крайне трудный предмет. В Кембридже мне рассказывали о докладе по общей теории относительности, с которым выступал во время войны сэр Артур Эддингтон. После доклада один из физиков заметил сэру Артуру: «Это был прекрасный доклад. Вы один из тех трёх в этом мире, кто понимает и знает общую теорию относительности». Когда на лице Эддингтона появилось выражение сомнения, этот физик заметил: «Господин профессор, не нужно смущаться, Вы слишком скромны». Сэр Артур ответил: «Я не смущён, я только думаю над тем, кто же третий».

Понимание общей теории относительности требовало знания математических методов, которые в то время были не только мало известны, но и недостаточно развиты. Общая теория относительности оказала влияние на дальнейшее развитие римановой, а позже и неримановой геометрии. Теория относительности сильно способствовала росту этих отраслей математики.

Знание общей теории относительности распространилось в Англии, Советском Союзе и других странах только после первой мировой войны. В 1919 г. были организованы две английские экспедиции, одна из которых направилась в Собрал (Бразилия), а другая — в Принцип (африканское побережье). Их задача состояла в том, чтобы во время солнечного затмения установить, отклоняются ли в гравитационном поле Солнца световые лучи, излучаемые звёздами, и совпадает ли этот эффект численно с предсказаниями общей теории относительности. Сообщённые в то время результаты, казалось, блестяще подтверждали предсказания Эйнштейна. Хотя более поздние измерения и ухудшили это согласие, ныне

всё же никто не сомневается, что световые лучи действительно отклоняются полем тяжести.

Явление отклонения лучей в поле тяжести Солнца вдруг очаровало весь цивилизованный мир. Эйнштейн, этот скромнейший человек, вскоре после 1920 г. стал всемирно известным учёным. Мне кажется, что внезапная, постоянно растущая слава Эйнштейна была обусловлена стремлением человечества к миру. Было открыто явление природы, столь же величественное и таинственное, как и само покрытое звёздами небо во время солнечного затмения, явление, приведшее к сотрудничеству учёных двух наций, два года до этого ещё воевавших между собой. Было открыто явление природы, теорию которого создал немецкий профессор, а истинность которого подтвердил английский учёный. Я считаю также, что этим вызвана и борьба реакции против Эйнштейна. Эйнштейн был, вероятно, самым знаменитым человеком в мире. Его больше других восхваляли, больше других и осмеивали. К тому и другому он оставался так же равнодушен, как и ко многим другим частным явлениям внешнего мира. Он, возможно, сам меньше, чем кто-либо другой, осознавал свою внезапную славу.

В то время как Эйнштейн формулировал и исправлял общую теорию относительности на страницах журнала *Berichte der Preussischen Akademie*, её развитие шло сравнительно медленно. Проникая всё глубже в проблемы тяготения, Эйнштейн неоднократно был вынужден возвращаться к своим работам для исправления тех или иных ошибок. Здание общей теории относительности было возведено к 1916 г., когда на страницах журнала *Annalen der Physik* в обширной работе под названием «Основы общей теории относительности» было дано полное изложение теории. Принципиальные изменения в теорию позже уже не вносились, хотя многие её положения подверглись дальнейшей разработке и многие новые результаты были добавлены. Среди следствий, которые могут быть получены из общей теории относительности, в отличие от классической механики, есть одно хорошо известное — движение перигелия Меркурия. В 1916 г. оно было первым подтверждением общей теории относительности. Известный астроном Шварцшильд вывел в то время это следствие совершенно строго из уравнений Эйнштейна. Это утверждение, однако, в известном смысле слишком упрощает действительное положение дела. Вся история решения этой проблемы гораздо сложнее. Я коротко остановлюсь на этом.

Общая теория относительности в том виде, в каком она была сформулирована в 1916 г., покоилась на двух опорах. Одной из них являлись уравнения поля, т. е. уравнения, описывающие изменения гравитационного поля или, если угодно, геометрического поля в пространстве и времени. Другой опорой являлись уравнения движения, которые определяют движение тела в таком гравитационном поле. Эти уравнения, т. е. уравнения геодезических

В 1915
Э. получил
материю
возм.

Шварцшильд
только
затем и
получил
то же

линий, заменяют прежние уравнения движения Ньютона, в которых сила тяжести пропорциональна ускорению. Теперь же, в общей теории относительности, уравнения движения, как и все вообще законы природы, справедливы в любой, а не только инерциальной системе отсчёта.

Следовательно, если мы, например, пожелаем определить движение какой-либо планеты в поле тяготения Солнца, то мы должны прежде всего определить с помощью уравнений поля общей теории относительности поле тяготения Солнца. После этого мы должны будем применить уравнение движения к найденному полю и определить движение планеты. Как раз это и было сделано с большим математическим блеском Шварцшильдом. Полученные им результаты справедливы однако только для очень маленькой по сравнению с Солнцем планеты. Но как обстоит дело в случае двойных звёзд, в случае задачи не одного, а двух тел? Метод Шварцшильда здесь неприменим. Вторая опора общей теории относительности здесь ничего не даёт!

В нашем распоряжении хотя и находятся как уравнения поля, так и уравнения движения, последние однако имеют лишь ограниченную справедливость. До 1938 г. не удавалось решить задачу движения двойных звёзд в рамках общей теории относительности, несмотря на то, что решение этой задачи в классической механике тривиально; оно почти также просто, как и решение задачи одного тела, т. е. задачи движения лёгкой планеты вокруг Солнца.

Эйнштейн уже давно считал, что уравнения движения в общей теории относительности не нужны, что эти уравнения нет необходимости постулировать, что их можно получить из уравнений поля, что мы можем отказаться от уравнений движения и что единственной опорой, на которой покоится общая теория относительности, являются одни только уравнения поля.

Это, как оказалось, было правильно, но доказательство потребовало много времени.

Все нужные для такого доказательства технические средства уже находились к 1916 г. в руках математиков и физиков. Им были известны уравнения поля. Необходимо было только показать, что в них уже содержатся уравнения движения. Всё это было похоже на поиски глубоко зарытого клада, местонахождение которого было известно. Эйнштейн неоднократно брался за решение этой проблемы. Он оставлял её затем, чтобы заняться многими другими вопросами, и возвращался к ней вновь. Когда к власти пришёл Гитлер, Эйнштейн покинул Берлин и стал в 1933 г. профессором в Institute for Advanced Studies в Принстоне. В 1938 г. была опубликована работа, в которой впервые из уравнений поля теории относительности были выведены уравнения, описывающие движение двойных звёзд в приближении, представляющем собой шаг вперёд по сравнению с уравнениями Ньютона.

Я уже говорил, что мой доклад не будет ни полным, ни объективным. Для порядка мне хотелось бы только перечислить здесь ещё те важнейшие темы, которые совершенно не были затронуты мной. Это — рассмотрение третьего эффекта, т. е. красного смещения, истории применения общей теории относительности к космологическим проблемам и поиски единой теории поля, которой Эйнштейн посвятил 35 лет жизни. Выбор проблем, затронутых в моём небольшом обзоре исторического развития теории относительности, был, конечно, субъективным.

Я попытаюсь ответить здесь ещё на один вопрос — на вопрос о том, что думает мир физиков по поводу общей теории относительности.

Мне кажется, что большинство физиков согласится с тем, что она является единственной разумной и изящной теорией поля тяготения. Существуют, правда, некоторые другие теории; теория Эйнштейна, однако, превосходит их по красоте, глубине и логической законченности. В некоторых из этих теорий движение перигелия Меркурия объясняется только при специальном выборе входящей в них постоянной. Напротив, в теории Эйнштейна нет новых постоянных, что является её громадным преимуществом. Чаше всего в этих других теориях тяготения используется инерциальная система отсчёта специальной теории относительности. Согласно некоторым из них центр тяжести двойных звёзд движется с ускорением (!), тогда как в общей теории относительности Эйнштейна этот центр ведёт себя разумно, т. е. перемещается только с постоянной скоростью. Физикам, придерживающимся собственной теории тяготения, теория Эйнштейна кажется слишком радикальной. Но, я думаю, что как раз в этом её сила. Фактически теория тяготения Эйнштейна не имеет серьёзных конкурентов. Общая теория относительности существует уже 40 лет! Выдвинутая одновременно с ней теория атома Бора устарела спустя двенадцать лет благодаря новой теории Шредингера и Гейзенберга. Знаменательно, что после сорокалетнего существования теория Эйнштейна является животворной теорией, что в этой области появляются важные работы, хотя она, правда, и не стоит в центре внимания физиков.

Существует, как я уже упоминал, очень маленькая группа физиков, предпочитающая по разным причинам другие теории тяготения. Вместе с тем существует и более многочисленная группа физиков, которая принимает математическую схему общей теории относительности, но отвергает эйнштейновскую интерпретацию её основных понятий. Две основные идеи общей теории относительности состоят в следующем:

1. Гравитационное и метрическое поля — идентичны.
2. Справедлив общий принцип относительности, т. е. допустимы любые преобразования.

Минус?
Умилка?

Обе эти идеи оспариваются некоторыми физиками. Одни из них, не возражая против эйнштейновских уравнений поля, видят в них только уравнения для определения поля тяжести, тогда как метрическое поле они считают псевдоевклидовым. Другие физики не верят в общий принцип относительности. Они постулируют такие координатные условия, которые выделяют группу систем координат, связанных преобразованиями Лорентца. Координатные условия рассматриваются в этом случае совместно с уравнениями поля.

Мой доклад не полемика, но всё же я хотел бы заметить, что Эйнштейн считает, что центр тяжести его теории лежит в принятии обоих упомянутых пунктов, особенно в принятии общего принципа относительности. Изменение этих гипотез означает, согласно Эйнштейну, ~~отход~~ от идей, приведших к общей теории относительности.

Заканчивая свой доклад, я хотел бы сделать ещё одно замечание.

Результаты исследований Эйнштейна уже и сегодня оказывают глубокое влияние на мир, они поднимают важные вопросы политического и морального характера. История развития атомной энергии берёт своё начало из соотношения эквивалентности между массой и энергией. Эйнштейн один из первых осознал после открытия деления ядер урана громадные возможности, заложенные в атомной энергии, и опасность злоупотребления ею.

На протяжении целого ряда лет Эйнштейн страстно борется против злоупотребления атомной энергией в целях массовых убийств, за сохранение мира во всём мире. В своём послевоенном послании к американскому народу он писал:

«На нас, учёных, развязавших эту чудовищную силу, лежит огромная ответственность за то, чтобы направить атомную энергию на служение благу человечества, а не на разрушение».

Этим посланием Эйнштейна я хотел бы закончить свой доклад. Мне остаётся ещё поблагодарить Вас за приглашение прочитать этот доклад в том самом городе и в том самом зале, в котором четверть века тому назад выступали Планк и Эйнштейн. Я хотел бы выразить моим слушателям и всему немецкому народу сердечное пожелание, чтобы в Берлине, в будущей столице воссоединённой и демократической Германии, расцветала теоретическая физика, достойная традиций, созданных Кирхгофом, Гельмгольцем, Планком и Эйнштейном.
