

ЭЙНШТЕЙН и ПУАНКАРЕ:  
по следам теории относительности

Жан-Поль ОФФРЕ

*Перевод с французского*

Jean-Paul AUFFRAY

EINSTEIN et POINCARÉ

*Sur les traces de la relativité*

*Édition Le Pommier*

2005

# Предисловие

Анри Пуанкаре и Альберт Эйнштейн олицетворяют собой два различных подхода к поиску истины. То, что их отличает, можно выразить тремя словами — математический склад ума. У Пуанкаре, в отличие от Эйнштейна, был именно такой склад ума, и мы увидим к каким последствиям это привело.

Сейчас ни для кого не секрет, что решающая роль Анри Пуанкаре в создании теории относительности была в значительной степени преуменьшена; в силу каких обстоятельств и причин, мы и постараемся пояснить. В нашем рассказе мы не будем следовать ни историку, ни физiku — мы предоставим героям этих захватывающих событий самим объяснять свои мотивы и приводить доводы, оставляя за собой право — или, может быть, обязанность — выбрать среди их аргументов те, которые прямо касаются нашей темы и всесторонне ее освещают.

В этой книге речь пойдет о философии, об истории и о науке. На какие-то вопросы мы даем ответы, а другие задаем сами. Книгу хорошо бы читать, следуя рекомендациям Декарта, сделанным при публикации в 1647 г. его «Начал философии»:

«... Я хотел бы, чтобы вы прочли сначала все целиком, как роман, не задерживая ни на чем особого внимания, и не останавливаясь на трудных местах, которые могут встретиться... Отметьте пером те места, которые вам показались трудными и продолжайте, не прерываясь, читать до конца. Я осмелюсь предположить, что при третьем прочтении, вы поймете все трудные места, отмеченные ранее; а если у вас все еще останутся какие-то вопросы, то и на них вы найдете ответы, перечитав книгу еще раз».

Во втором издании я постарался поглубже отразить роль ее основных персонажей и прояснить некоторые не вполне ясные моменты. Надеюсь, читатель оценит мои усилия.

# Странные вопросы

Заголовок взят из названия трактата, опубликованного в 1634 г. преподавшим Мареном Мерсенном и полностью озаглавленного так: *«Странные вопросы или Развлечения ученых. Содержит множество вопросов, связанных с теософией, философией и математикой. Издано в Париже Жаком Виллери, 1634. С разрешения короля. In -8°. Предисловие и 180 стр.»*. За этим трактатом последовали четыре других, опубликованных в том же году — *«Вопросы Гармонии»*, *«Вопросы Теологии»*, *«Механика Галилея»* и *«Введение во Вселенскую Гармонию»*.

Мы предлагаем читателю рассмотреть два из этих «странных вопросов», предварительный анализ которых облегчит нам знакомство с тайнами теории относительности.

## Абберация света

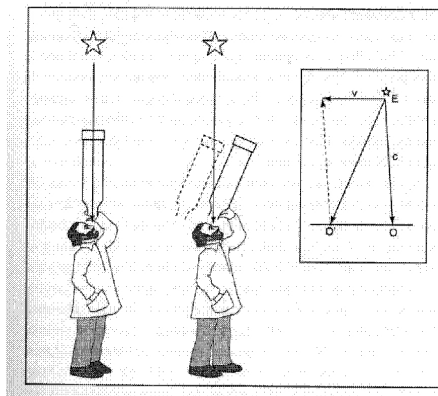
### Капитан Пьерони наблюдает звезды

Как часто слава зависит от какого-то пустяка! В 1639 г. друг Галилея, проживавший в Германии тосканский инженер Джованни Пьерони, сделал открытие, которое превратило бы его в открывателя явления астрономической абберации. . . если бы он его правильно истолковал. После многократных наблюдений, заметив положение некоторых звезд на небе, он совершенно точно установил, что они находятся не совсем на том месте, где он, после столь частых наблюдений ожидал бы их увидеть, т.е. они как бы перемещались. Отклонение было весьма незначительным — всего несколько угловых секунд, но между тем оно определенно существовало. Учитывая, что оптические приборы, которыми он располагал в то время, были весьма примитивны, замечательно уже то, что он заметил это минимальное изменение положения. . . и вообще обратил на него внимание!

Пьерони ошибочно решил, что он впервые в истории астрономии наблюдал звездный *параллакс*, т.е. смещение удаленного объекта (в данном случае звезды) при перемещении по отношению к нему наблюдателя.

Рассмотрим, что такое параллакс.

Пусть в поле моего зрения находятся два удаленных объекта, один из которых (назовем его *G*) на мой взгляд, находится слева от другого. Который из них ближе ко мне? Чтобы это определить, мне достаточно немного отодвинуться вправо. Когда я совершу это передвижение, произойдет одно из двух — либо мне покажется, что оба объекта начнут *сближаться*, и



Астроном наблюдает звезду. Если эта звезда «закреплена» на небе над ним, астроном видит ее в «правильном» направлении. Однако, если она движется по отношению к нему (или он по отношению к ней, что, в общем, одно и то же) ему, чтобы увидеть ее, приходится направить телескоп в не совсем «правильном» направлении. Угол этой «абберации» может достигать 20 угловых секунд. Попытки объяснить такую абберацию заложили основу работ, которые привели к открытию теории относительности.

в этом случае объект  $G$  находится от меня дальше, чем другой, либо они начнут *отдаляться*, и тогда объект  $G$  находится ближе.

Решив, что он наблюдал параллакс, капитан Пьерони сразу же сообщил об этом дипломатическому представителю Тосканы в Венеции, Франческо Ринучини, который передал эти сведения Галилею, доживавшему последние месяцы среди флорентийских холмов на своей вилле д'Аркетри.

«Какие же выводы можно сделать на основе наблюдений, столь трудно выполнимых и результаты которых достаточно сомнительны?» — спрашивает Галилей, проявивший в данном случае удивительную сдержанность.<sup>1</sup> Прошел почти целый век, прежде чем начатые Пьерони наблюдения возобновились... и привели к выводам, разительно отличавшимся от выводов капитана-первооткрывателя.

На рождество 1725 г. частную обсерваторию астронома-любителя Самюэля Молине, расположенную неподалеку от Кью, посетил молодой доктор Джеймс Брэдли, профессор астрономии Оксфордского университета. Наблюдая звезду  $\gamma$  Дракона, они обнаружили, что она расположена южнее, чем они предполагали. Решив поначалу, что произошла ошибка, они начали регулярные наблюдения. После смерти Молине Брэдли подтвердил этот странный результат — если звезда постоянно передвигается, то ее перемещение происходит в направлении... противоположном тому, которого можно было бы ожидать, если бы речь шла о параллаксе!

Сообщив в Королевское общество о своем открытии<sup>2</sup>, он предлагает объяснение тому, что называл «новым перемещением неподвижных звезд»: кажущееся перемещение звезды по небу является не параллаксом, а *абберацией* (от лат. *aberrare* — удаляться, отодвигаться), объясняющейся скоростью распространения света.

Объяснение, предложенное Брэдли, кажется очень простым. Луч света, исходящий от звезды, попадает в телескоп. Чтобы попасть в глаз наблюда-

телю, он должен еще пройти всю длину телескопа. За это мгновение, как бы кратко оно ни было, Земля перемещается, а вместе с ней и наблюдатель с телескопом. Чтобы компенсировать этот сдвиг, наблюдателю приходится ориентировать телескоп в направлении, которое не совсем «правильно». И таким образом он видит звезду не там, где она на самом деле находится. Это и есть абберация.

Если вам, читатель, трудно принять объяснение, которое мы только что привели — как может свет на столь коротком расстоянии произвести такой эффект? — успокойтесь, его действительно трудно принять, и лучшим математикам и физикам того времени пришлось приложить немало усилий, чтобы разрешить эту проблему.

## Модели Эйлера

Леонард Эйлер (1707–1783) сын протестантского священника, чей приход был расположен в Риене, недалеко от Базеля, подчиняясь воле отца, изучал теологию и иврит в Базельском университете. Там Жан Бернулли, ученик Лейбница, заметил его необыкновенные способности и начал давать ему бесплатно один урок математики в неделю. Вскоре Никола и Даниель Бернулли стали его друзьями.

Призванный в Санкт-Петербургскую Академию, он приехал туда... в день смерти императрицы Екатерины I, вдовы Петра Великого. В 1739 г., будучи главой математического факультета, Эйлер узнал о работах Брэдли по абберации и немедленно попытался рассчитать этот эффект.

В те времена существовали два основных прямо противоположных взгляда на природу света. Одни ученые разделяли взгляды Христиана Гюйгенса (1629–1695), предложенные столетием ранее: свет является колебанием, которое распространяется в упругой среде, называемой эфиром. Другие придерживались «баллистической» концепции Исаака Ньютона, в соответствии с которой лучи света состоят из корпускул (которые Ньютон назвал *rais*), распространяющихся с большой скоростью прямолинейно.

Для изучения проблемы абберации Эйлер построил ее простейшую модель<sup>3</sup>. Представим себе движущийся источник света и наблюдателя, находящегося в состоянии покоя. Источник испускает луч (*rai*), которому сообщает скорость  $v$ , т.е. приводит его в движение. Луч распространяется в сторону наблюдателя со скоростью, которая рассчитывается согласно известному правилу параллелограмма, сторонами которого являются «естественная» скорость  $c$  и скорость  $v$ , и, следовательно, луч достигает глаза наблюдателя со скоростью и направлением, отличными от того, как если бы источник находился в состоянии покоя. Угол между двумя векторами скоростей и является абберацией.<sup>4</sup> Такая модель объясняет абберацию наложением естественной скорости светового луча на скорость лучей, испускаемых самим источником. Этот результат привел Эйлера в восторг, ибо показался ему «весьма естественным».

Тем не менее, он построил вторую модель, где наблюдатель движется со скоростью  $v$ , а источник света остается неподвижным. Это «реалистическая» модель, которая соответствует положению наблюдателя, находящегося на Земле (т.е. в движении) и наблюдающего в телескоп «неподвижную» звезду. Чтобы модель работала, Эйлер предполагает, что источник и наблюдатель составляют вместе систему, которая, по его замыслу, имеет ту

же скорость, но движется в противоположном направлении по отношению к первой модели. Это «преобразование» приводит в движение источник, а наблюдатель остается в состоянии покоя — точно так же, как это было в первой модели. . . Но Эйлер замечает, что такое преобразование не позволяет ответить на один вопрос, который, между тем, является фундаментальным: как это преобразование влияет на световой луч? Сообщает ли оно скорость  $v$  лучу, так же как источнику и наблюдателю? Или же оно на него не влияет?

Когда Эйлер построил третью модель, сразу возник тот же вопрос. На этот раз, свет является не корпускулой, а волной, распространяющейся в эфире Гюйгенса. Эйлер применил открытое им преобразование. Ему следовало решить — сообщает ли преобразование скорость  $v$  той среде, которая существует между наблюдателем и источником, т.е. эфиру?

Эйлер пробует два подхода: преобразование не сообщает эфиру никакой скорости, после преобразования эфир находится в состоянии покоя по отношению к наблюдателю; или же преобразование сообщает свою скорость  $v$  эфиру, и после преобразования эфир находится в состоянии покоя по отношению к источнику. Какое решение верно?<sup>5</sup>

Ответ был найден быстро: только второе предположение дает верное решение, полученное с помощью первой модели, которая «объясняет» аберрацию. Но тогда, замечает Эйлер, «очевидно, что покоящийся источник будет представляться движущемуся наблюдателю иначе, чем движущийся источник покоящемуся наблюдателю — даже, если движение источника будет эквивалентным (по абсолютной величине), но противоположным движению наблюдателя».

Можем ли мы принять такое различие?

«Нет!» — восклицает Эйлер. И с сожалением заключает, что волновая гипотеза не дает удовлетворительного объяснения астрономической аберрации, и ей следует предпочесть баллистическую теорию «более соответствующую нашему подходу и позволяющую дать описание движения, которое невозможно при использовании волновой теории».

Накануне Французской революции, спустя пять лет после смерти Эйлера, Жозеф Луи де Лагранж (1736–1813) публикует «с соизволения короля и с привилегиями, данными владелице книжного магазина вдове Десен, улица Дю Фуан Сен-Жак в Париже» трактат, заложивший основу новой эры в математической физике — «*Аналитическая механика*»<sup>6</sup>. В последней главе, продолжая работы Жана Лё Рон Даламбера, Лагранж вывел уравнение, которое, по его словам, содержит «истинную теорию волн, возникающих при бесконечно малых сменяющих друг друга возвышениях и понижениях стоячей воды, которая наполняет мелкий канал или резервуар».

Это уравнение замечательно тем, что им можно описать распространение любой волны в любой среде — и поэтому сегодня мы называем его волновым уравнением.

По мнению Лагранжа, распространение звуковой волны в воздухе основывается на трех наблюдениях:

1. Воздух перемещается и это движение вызывает локальное изменение плотности.
2. Локальное изменение плотности вызывает локальное изменение давления.

3. Локальные изменения давления вызывают движение воздуха, и затем все повторяется.

Короче говоря, перемещение воздуха, начавшись один раз, превращается в настоящий «порочный круг»... который, однако, функционирует по определенным правилам. Талант Лагранжа проявился в том, что он открыл механизм этого действия.

Фундаментальной характеристикой прямой линии является то, что она «прямая». Напротив, окружности, эллипсу, параболе свойственно быть искривленными. Пойдем дальше. Кривизна окружности одинакова повсюду. Кривизна эллипса меняется от одной точки к другой, но не произвольно. От менее изогнутой (по обе стороны малой оси), она становится более выраженной по сторонам большой оси. Волне, распространяющейся в упругой среде, соответствует геометрический профиль, кривизна которого также меняется от точки к точке. Но этот профиль не совсем тот, что присущ окружности и не совсем тот, что присущ эллипсу.

Уравнение, описывающее волну, математически очень просто и одновременно очень эффективно. Рассмотрим самый простой случай, когда волна распространяется в одном направлении, которое мы назовем «осью  $x$ ».

Скорость распространения нашей волны будет зависеть от природы среды, в которой она распространяется. Когда волна возникла, она постоянно распространяется в данной среде с данной скоростью, заданной раз и навсегда (при условии, что среда остается той же).<sup>7</sup>

Пусть  $v$  есть данная скорость и  $a$  есть амплитуда волны в точке  $x$  в момент  $t$ . По Лагранжу, искривление геометрического профиля волны выражается двумя разными способами: либо как функция  $x$  в некий данный момент — обозначим ее  $X$ ; либо как функция  $t$  в некоем заданном месте — обозначим ее  $T$ . Оба эти значения связаны между собой уравнением  $v^2 X = T$ . Это и есть волновое уравнение.<sup>8</sup> Заметим, что в нем все так просто и вместе с тем так важно, что часто и бывает с большими открытиями.

## Как распространяется свет?

Однажды, прогуливаясь по крепостному валу в Перпиньяне, городке в Восточных Пиренеях, некий юноша заметил очень молодого военного инженера, наблюдавшего за работами. «Как вам удалось так быстро получить офицерский чин? — Я окончил Политехническую школу».\*

Любопытного юношу, которому в то время было 14 лет, звали Франсуа Доминик Араго (1786–1853). Найдя лучшие по тем временам математические сочинения, он самостоятельно выучил их наизусть. Проэкзаменованный без всякого снисхождения младшим братом знаменитого Монжа<sup>†</sup>, он показал шестой результат, и был принят в Политехническую школу в 1803 г. Ему исполнилось тогда 17 лет. Через шесть лет его избрали в Академию наук, и он сразу же занялся изучением скорости излучаемого звездами света с помощью достаточно оригинального прибора — нескольких скрепленных призм — который позволял заметить ничтожную разницу в скорости рефракционных световых лучей. В шесть часов вечера, зимой, когда уже

\* Политехническая школа (l'École polytechnique) в то время была военным учебным заведением, и ее выпускники получали офицерский чин. — (прим. перев.)

<sup>†</sup> Имеется в виду Луи Монж (1748–1827), французский математик, младший брат Гаспара Монжа (1746–1818), известного математика того времени. — (прим. перев.)

совсем темно, он наблюдал Поллукс,  $\alpha$  Ориона и Спикку из созвездия Девы в то время, когда они проходят меридиан.

Перемещаясь по орбите, Земля в это время удаляется от них. Затем он наблюдал другие звезды, которые проходят через меридиан в шесть часов утра, когда Земля к ним приближается. Араго считал, что в первом случае скорость движения Земли будет прибавляться к скорости света, а во втором — вычитаться. К его изумлению, ничего подобного не происходило. Он поинтересовался у своего друга Огюстена Френеля (1788–1827), не легче ли этот отрицательный результат «примирить с системой, в которой свет существует в виде колебаний универсальной жидкой среды»<sup>9</sup>, чем с баллистической теорией?

В это время Френель тоже задает себе вопрос — как распространяется свет? В письме, которое он пишет Араго в 1818 г., Френель предлагает свою интерпретацию отрицательного результата, полученного его другом. Он вспоминает, что свет можно считать волной, распространяющейся в невидимой упругой среде — эфире. Если распространение происходит в соответствии с волновым уравнением, возникает вопрос: а сам-то эфир, переносящий световые волны, неподвижен или же увлекается движущимися в нем телами?

Чтобы описать, как будет вести себя свет при абберации, Френель выводит уравнение, которое станет одним из самых знаменитых в истории физики, и вполне заслуженно (хотя физикам понадобилось столетие, чтобы понять его значение). Это первое «релятивистское» уравнение.

Стекло телескопа, объясняет Френель, содержит избыток эфира, соответствующий различию в плотности между ним и воздухом. Когда телескоп находится в движении — что и происходит на практике, т.к. он движется вместе с Землей по ее орбите вокруг Солнца — он увлекает за собой избыток эфира, но только частично.<sup>10</sup>

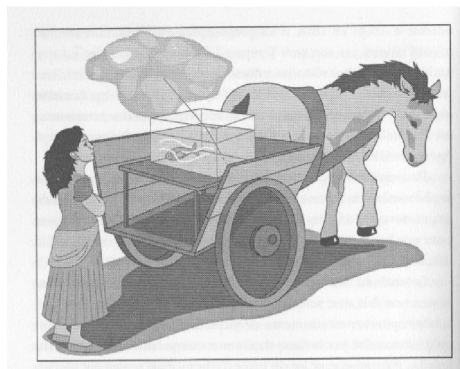
Именно это «частично» и явилось огромным вкладом Френеля в физику. Более того, Френель не только предположил частичное увлечение эфира, но и вывел следующую формулу: если  $v$  — скорость перемещения Земли, то скорость этого «частичного увлечения» равна  $v(1 - 1/n^2)$ , где  $n$  — коэффициент преломления стекла.<sup>11</sup> Это и есть «формула Френеля».

Араго принимает это объяснение: «Теории, — замечает он, — есть ничто иное, как более или менее удачные объяснения уже известных фактов. Но когда все новые следствия, которые из них вытекают, приводят к соответствию с опытом, они приобретают особую важность».<sup>12</sup>

Все это происходило в 1818 году. А в 1845 году разразилась сенсация. Ирландский математик сэр Джордж Габриель Стокс (1819–1903) предлагает объяснение того же явления, основанное на совсем другом подходе. Он утверждает, что эфир полностью увлекается Землей «на ее поверхности» и, следовательно, находится в состоянии «полного покоя» по отношению к телескопам, находящимся на Земле! Какая же из этих противоборствующих теорий является «правильной»? Теория Стокса не очень-то правдоподобна.<sup>13</sup> Объяснение Френеля хотя и более сложное, основывается, тем не менее, на уравнении, которое «объясняет все». Следовательно, его и нужно принять. . . пока не найдется лучшего.

В 1827 году, спустя четверть века после безвременной смерти Френеля в Вильль-д'Авре, Арман Ипполит Физо (1819–1896) ставит опыт, в котором он использует два луча, испускаемых одним источником. Он пропускает их че-





*Рыбка в аквариуме ведет себя одинаково, вне зависимости от того, находится она в покое или в состоянии прямолинейного равномерного движения. Это есть принцип относительности Галилея. Как показал Пуанкаре в 1888 году — за 17 лет до открытия теории относительности — то же относится и к оптическим явлениям, в частности, к рефракции света при его попадании в воду.*

рез две параллельные, наполненные водой трубки длиной в 1,5 м. На выходе из трубок образуются интерференционные полосы, которые он наблюдает с помощью окуляров, оснащенных микрометром. Если вода в трубах течет в другую сторону, Физо замечает перемещение интерференционных полос. Они перемещаются либо вправо, либо влево, в зависимости от направления движения воды. Расчеты, основанные на предположении о том, что скорость перемещения соответствует той, которую дает формула Френеля «дает результат очень близкий к полученному экспериментально».<sup>14</sup>

Эти результаты вскоре были подтверждены в Англии. В Гринвиче британский астроном сэр Джордж Биддел Эйри (1801–1892) наблюдает звезду, затем наполняет свой телескоп водой и повторяет наблюдение. Он предполагает, что результат будет другим. Однако ничего такого не происходит.<sup>15</sup> Аберрация остается такой же, независимо от того, наполнен телескоп водой или нет. Он решает применить формулу Френеля — для воды она дает коэффициент частичного увлечения величиной 44%. Это частичное увлечение точно компенсирует ожидавшийся им эффект.<sup>16</sup>

Вслед за отрицательными результатами, полученными Араго и Физо, этот результат — тоже отрицательный! — подтверждает теорию Френеля: похоже, в природе что-то «компенсирует» (и абсолютно точно) ожидаемый эффект, вызванный рефракцией света при аберрации. И, если согласиться с формулой Френеля — а в то время, она была единственной, которой располагали физики — это что-то есть «частичное увлечение» эфира преломляющей средой, через которую проходит свет.

В тот момент физики, решив исходить из такого объяснения, упустили из виду, что всякая гипотеза, сформулированная с единственной целью «спасти лицо» того явления, которое она объясняет, подозрительна и при первом же подходящем случае ей уделят самое пристальное внимание.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Г. Галилей Письмо Франческо Ринучини, 23 марта 1641 г., *Biblioteca nazionale centrale*, Florence.

<sup>2</sup>Bradley J., *An Account of a New Discovered Motion of the Fix'd Stars*, Philosophical Transactions, vol. XXXV, 1727–1728, p. 637–661.

<sup>3</sup>Euler L. *Explicatio phaenomenorum quae a motu lucis successive oriuntur*, 1739, Opera Omnia, vol. III, 5, p. 46–80.

<sup>4</sup>Тангенс этого угла равен отношению  $v$  к  $c(v/c)$ .

<sup>5</sup>Преобразование, рассмотренное Эйлером, есть «мысленный эксперимент», в котором он может выбирать, как модель должна работать. Цель состоит в том, чтобы получить желаемый результат.

<sup>6</sup>Lagrange J.L. de, *Mécanique analytique*, 1788. В предисловии к этому трактату Лагранж объясняет: «В этой работе вы не найдете чертежей. Предлагаемый мной метод не требует ни построений, ни геометрических или механических рассуждений, а использует лишь алгебраические операции, применяемые последовательно и единообразно». Так зародилась современная математическая физика.

<sup>7</sup>Звук, например, имеет различные скорости в воздухе и в воде.

<sup>8</sup>В современных обозначениях волновое уравнение записывается так:  $v^2 \nabla^2 a = \partial^2 a / \partial t^2$  или, еще лучше  $[\nabla^2 - (1/v^2) \partial^2 / \partial t^2] a = 0$ . Эти обозначения применяются для облегчения чтения и понимания уравнений.

<sup>9</sup>Fresnel A., *Œuvres complètes*, Imprimerie impériale, Paris, t. II, 1868, p. 628.

<sup>10</sup>Fresnel A., «Lettre a Arago», septembre 1818, *Œuvres complètes*, op. cit., t. II, p. 627–636.

<sup>11</sup>Если  $c$  является скоростью света в пустоте и если  $c'$  является его скоростью в стекле, коэффициент преломления на границе раздела воздух–стекло выражается соотношением  $n = c/c'$ . Принято, что для воздуха  $n = 1$  ( $n$  для обычного стекла равно примерно 1,5).

<sup>12</sup>Arago F.D., cité dans Maurice Daumas, *Arago*, Paris, Gallimard, 1943, réimpression Belin, coll. «Un savant, une époque», 1987, p. 104.

<sup>13</sup>Если принять, что эфир «несжимаем», полное увлечение эфира возможно лишь при очень сильном его «проскальзывании» у поверхности Земли, что противоречит фундаментальным положениям теории Стокса.

<sup>14</sup>Fizeau H., *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 33, 1851, p. 349. Объяснение опыта Физо, приведенное здесь, основывается на объяснении Пуанкаре, данном в «*Théories mathématiques de la lumière*», Georges Carre ed., Paris, 1889, éditions Jacques Gabay, 1995, p. 385.

<sup>15</sup>Так как в воде свет распространяется гораздо медленнее, чем в воздухе, ему требуется больше времени на прохождение того же расстояния в телескопе, наполненном водой, чем в наполненном воздухом. По этой причине абберация должна была бы быть еще очевиднее.

<sup>16</sup>По формуле Френеля телескоп, наполненный водой, перемещается со скоростью  $v$ ; эфир, который он увлекает, перемещается со скоростью  $0,44v$ .

## Электродинамика

### «Ужасающие опыты»

Пока астрономы бьются над абберацией, физики-первопроходцы изучают электростатические явления, выделяют два вида электричества, изобретают конденсаторы, определяют законы электрического притяжения и «познают природу молнии». Проследим некоторые этапы этих исследований: они приведут нас шаг за шагом к той двери, за которой мы познакомимся с открытием теории относительности.

В 1743 году в Лейпциге Георг Матиас Бозе (1710–1761) занялся совершенствованием «электрической машины». Изобретена она была его коллегой, профессором математики Христианом Августом Хаузенем (1693–1743). Машина состояла из стеклянного шара, который приводился в движение с помощью колеса. Бозе добавляет к этой конструкции (скромное) усовершенствование: жестяную трубку, которая служит проводником. Он констатирует, что человек, который наэлектризовывает шар, натирая его рукой, в то время как шар поворачивается, сам наэлектризовывается так же, как и шар! У человека, который стоит на бочке с твердым дегтем,<sup>1</sup> все тело начинает светиться. Начиная с ног, свечение поднимается до самой головы, вокруг которой образуется что-то вроде ореола – явление, которое он назвал «беатификацией».

Спустя два года в Лейдене физик-любитель по имени Кунеус присутствует при опыте Питера Ван Мушенброка (1692–1761). Мушенброк утверждает, что вода электризуется гораздо лучше, если ее налить в стеклянную бутылку. Кунеус у себя дома повторяет опыт, по недосмотру изменив его: держа в одной руке бутылку, в которой находится металлическая проволока, соединенная с проводником, он отводит ее от проводника и берется за проволоку другой рукой. И мгновенно получает в руку и в грудь сильнейший удар — незадачливый экспериментатор открыл... электрический ток! Узнав об этих «ужасающих опытах», аббат Нолле в Париже подхватил эстафету. Он решил подробнее изучить это явление, чтобы прояснить его природу в мельчайших деталях.

### «Электрические столкновения»

В 1800 г. в Комо граф Алессандро Вольта (1745–1827) изготовил конструкцию, состоящую из нескольких цинковых и медных дисков, разделенных суконными кружочками, смоченными водой. Это и была первая электрическая батарейка, названная (совершенно заслуженно) вольтовым столбом.

Профессор Копенгагенского университета, датский физик Ханс Кристиан Эрстед (1777–1851) был в 1820 г. адептом натурфилософии, системы взглядов, согласно которой материя есть проявление простейших сил — притяжения и отталкивания, — взаимодействие которых и производит все наблюдаемые свойства материальных тел. Для объяснения этих взаимодействий он предлагает новую гипотезу, согласно которой электричество и магнетизм, а также флогистон (гипотетическая жидкость, переносящая теплоту) плюс свет есть проявления «электрических столкновений». Он пытается найти явление, в котором электричество и магнетизм влияли бы друг

на друга, и обнаруживает его, соединяя между собой концы металлической проволоки, идущие от двух полюсов вольтова столба. Это соединение вызывает желаемый эффект, проявляющийся в отклонении намагниченной стрелки, расположенной под проволокой.

В соответствии с существовавшими тогда (в частности, во Франции) взглядами, «соединительная» проволока должна была нейтрализовать ток, а не заставлять магнитную стрелку поворачиваться. Эрстед повторил эксперимент. Результат был тот же. Он тогда же опубликовал работу на латыни, в которой изложил это наблюдение.<sup>2</sup> В августе в Швейцарии появился перевод этой работы на французский.

Оказавшись в Женеве, Араго узнал о работе Эрстеда, где прочел следующую поразившую его фразу: «Из изложенного выше становится ясно, что электрическое столкновение не заключается в проводнике или в соединительной проволоке, но распространяется в окружающем пространстве, и даже довольно далеко». Его охватывает энтузиазм. Вернувшись 11 сентября 1820 г. в Париж, он повторяет опыт перед членами Академии наук. Спустя две недели, он описывает его в Бюро долгот.

На заседании присутствует поэт, математик и мечтатель Андре Мари Ампер (1775–1836). Пораженный этим удивительным явлением, он в начале осени молниеносно, за несколько недель, проделывает серию опытов и расчетов.<sup>3</sup> Он идет дальше «единичного факта датского физика», заменяет намагниченную стрелку второй соединительной проволокой,<sup>4</sup> т.к. считает, что первая «будет действовать на вторую как на намагниченную стрелку». За одну неделю он открывает законы, которые управляют образованием магнитных полей, вызываемых электрическим током, и устанавливает действие магнитных полей на электрический ток, объединяя электричество и магнетизм в одну науку. Все эти исследования он подытожил в докладе, прочитанном 28 апреля перед членами Академии наук:<sup>5</sup>

«[Действие, производимое вольтовыми столбами] можно приписать лишь быстро перемещающимся в проводнике жидкостям, текущим от одного конца столба к другому».

Он предлагает новый термин: «Так как явления, о которых здесь идет речь, производятся только движущимся током, я решил, что их следует назвать явлениями «электродинамическими»;<sup>6</sup> название «электромагнитические», которое использовалось до сих пор [...] представлялось бы теперь, когда я открыл, что подобное явление наблюдается и без магнита, ложным». Через несколько строк он прямо говорит об «электрических молекулах»<sup>7</sup> и утверждает, «что совершенно уверен в том, что всем исследованиям такого рода должно предшествовать исключительно экспериментальное установление законов и определение, выведенное исключительно из этих законов, величин элементарных сил, направление которых по необходимости совпадает с прямой, соединяющей взаимодействующие между собой материальные точки».<sup>8</sup>

Открытый им закон, таким образом, описывает взаимодействие между точками и действует «по необходимости» по прямой, соединяющей эти точки. Одним словом, Ампер предлагает «точечный закон». Отныне он говорит о «взаимном действии» элементов тока,<sup>9</sup> всегда проявляющемся по прямой, соединяющей эти элементы, из-за чего действие, вызываемое одним элементом равно и противоположно по направлению действию другого элемента.<sup>10</sup> В результате, он проглядел фундаментальный момент, разработ-

кой которого займется математики Геттингенской школы, выдвинув заодно электродинамику в первый ряд физических дисциплин.

## Точечные законы

В 1833 г. Вильгельм Вебер (1804–1891) работает в Геттингене у великого Гаусса, короля математиков,<sup>11</sup> вместе с которым он изобретает и строит первый электрический телеграф! В 1850 г. он основывает геттингенский Институт «математической физики», первый в своем роде. Среди других студентов туда поступил скромный талантливый юноша Бернгард Риман (1826–1866). В течение нескольких лет Вебер, Гаусс и Риман, каждый на свой манер, пытались решить фундаментальную для своего времени задачу математической физики: найти «точечный закон» (который они называли «фундаментальным») передачи электрической силы между движущимися телами.

Между движущимися телами — в этом и заключается новизна. Ведь все указывает на то, что столь дорогое сердцу Ампера взаимное действие элементов тока выглядит иначе, чем ему представлялось, когда заряды, перемещающиеся в этих элементах, движутся по отношению друг к другу. Это последнее соображение Ампер во внимание не принял. По закону Кулона<sup>12</sup> два электрических заряда  $e$  и  $e'$ , расположенные на расстоянии  $r$ , взаимодействуют с силой  $F$ , равной  $ee'/r^2$  и действующей «на расстоянии» мгновенно. Вебер задает себе вопрос — а что происходит, когда оба заряда находятся в движении по отношению друг к другу? Чтобы ответить на этот вопрос, он опирается на три наблюдения:

1. Два элемента тока, расположенные один за другим, либо отталкиваются, либо притягиваются в зависимости от того, проходит в них ток в том же направлении или в противоположном.
2. Два элемента тока, расположенные параллельно, либо притягиваются либо отталкиваются в зависимости от того, проходит в них ток в том же направлении или в противоположном.
3. Элемент тока, находящийся в продолжении проводника, индуцирует в нем ток, который идет либо в том же, либо в противоположном направлении, при этом его сила либо уменьшается, либо увеличивается.

Из этих трех наблюдений Вебер заключает, что в формулу, которую он ищет, должны входить, с одной стороны, скорость  $v$ , с которой электрические заряды сближаются или удаляются, и, с другой стороны, ускорение  $a$  движения этих зарядов по отношению к друг другу. Как с помощью простой формулы выразить мысль о том, что сила эта не просто  $F = ee'/r^2$  (по закону Кулона), но что она зависит и от относительной скорости элементов тока?

Вебер полагает  $Fv = F(1 - kv)$  и тут же осознает, что  $kv$  в этой формуле должно соответствовать некоему «числу» (чтобы его можно было вычесть из 1). Следовательно, коэффициент  $k$  является величиной, обратной скорости  $V$ .

Тогда он полагает  $k = 1/V$ , где  $V$  является скоростью, значение которой еще предстоит найти. Уравнение приобретает вид  $Fv = F(1 - v/V)$ .

Теперь нужно ввести в уравнение второй член, который будет зависеть от ускорения относительного движения  $a$ . Он записывает  $Fv = F(1 - v/V + ba)$ . Теперь уравнение содержит два параметра: скорость  $V$  и константу  $b$ , значение которых еще предстоит определить. Но так как уравнение отличается простотой, Вебер надеется видоизменить его так, чтобы получить желаемые результаты. И здесь он делает открытие, которое станет одним из самых плодотворных в истории физики.

Вебер понимает — чтобы его уравнение работало правильно, нужно положить  $b = 2r/V^2$ .

Фундаментальный закон теперь имеет вид  $Fv = F(1 - v/V + 2ar/V^2)$  и зависит только от одного параметра, скорости  $V$ , и это весьма обнадеживающий результат. Затем Вебер замечает, что при нулевом ускорении формула приобретает вид  $Fv = F(1 - v/V)$ . И более того, если  $v = V$  то  $Fv = 0$ ! Итак,  $V$  — это скорость, при которой сила между зарядами исчезает, т.е. это скорость, при которой электродинамическое действие в точности уравнивается электростатическое. Следовательно, параметр  $V$  непосредственно связан с отношением электростатической единицы к электродинамической единице.<sup>13</sup> Этот результат приводит Вебера в восторг. С помощью физика-экспериментатора Рудольфа Кольрауша он измеряет  $V$  и получает результат  $V = 311\,000$  км/сек<sup>-1</sup>. Поразительно! Ведь это практически... скорость света в вакууме.

Вебер сообщает о своем удивительном открытии Гауссу. Король математиков не совсем удовлетворен. Он считает, что следует найти способ вывести силы, которые возникают между зарядами, исходя не из мгновенного действия на расстоянии, а исходя из действия, которое распространяется от одного места к другому наподобие волны. Он говорит, что в 1839 г. и сам пытался сформулировать фундаментальный закон, основанный на этой идее, но полученное им уравнение не учитывало корректно явление индукции и он отказался от своей идеи.

В 1850 году в Геттинген приезжает Бернгард Риман и, в свою очередь, увлекается этой задачей. Чтобы ее решить, он формулирует революционную теорию, согласно которой все наэлектризованные тела создают *потенциал*,<sup>14</sup> распространяющийся в пространстве со скоростью света, и достигает точек, расположенных на расстоянии  $r$ , за время  $r/c$ . Тем самым он тоже формулирует фундаментальный закон...

## Электромагнетизм

В 1873 году шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879), основавший знаменитую Кавендишскую лабораторию в Кембриджском университете,<sup>15</sup> публикует свой большой двухтомный труд «Трактат об электричестве и магнетизме».<sup>16</sup> В предисловии к первому изданию (датированному 1 февраля 1873 года) он поясняет что именно, по его мнению, следует понимать под термином «электромагнетизм»:

«Уже древним был известен тот факт, что некоторые тела, будучи наэлектризованы, начинают притягивать другие тела. Эти явления были названы электрическими, так как янтарь — по-гречески *ηλεκτρον* (электрон) — был первым веществом, на котором они наблюдались. Другие тела также известны как вещества, способные к действию на расстоянии. Было установлено, что эти явления... отличаются от электрических, они получили названием маг-

нитных – по названию находимого в Фессалийской Магнезии магнитного железняка –  $\mu\alpha\gamma\eta\varsigma$  (магнес). С течением времени было установлено, что оба эти класса находятся в связи друг с другом. Их зависимости составляют науку об электромагнетизме».<sup>17</sup>

Затем он говорит о причинах, которые побудили его написать этот труд. Все они связаны с именем Фарадея,<sup>18</sup> боготворимого в то время в Великобритании. Он поясняет:

«Я знал, что между пониманием явлений Фарадеем и концепцией математиков предполагалось наличие такой разницы, что ни тот, ни другие не были удовлетворены языком друг друга».

Математиками, о которых идет речь, как уже догадался читатель, были Ампер, Гаусс, Вебер и Риман — все «жители континента». Соперничество между британскими и европейскими учеными, усилившееся после стычки Ньютона с Лейбницем из-за приоритета в создании дифференциального исчисления, продолжалось. Максвелл был убежден, что это различие во взглядах «возникало не из-за неправоты какой-либо из сторон» и задался целью выразить идеи Фарадея языком математики, «чтобы сравнить с методами профессиональных математиков».

И вот что он обнаруживает:<sup>19</sup> «Фарадей видел<sup>20</sup> пронизывающие всё пространство силовые линии там, где математики видели центры сил, притягивающих на расстоянии; Фарадей видел среду там, где они не видели ничего кроме расстояния; Фарадей предполагал источник и причину явлений в реальных действиях. Когда я переводил то, что считал идеями Фарадея, в математическую форму, я нашел, что в большинстве случаев результаты обоих методов совпадали». Из всего этого он заключает, что «многие из открытых математиками методов могли быть значительно лучше выражены с помощью идей, вытекающих из работ Фарадея, чем в их оригинальной форме», и приступает к их синтезу.

Теперь ему ясна программа действий:

1. Показать, что электромагнитные явления поддаются измерению.
2. Установить «математические зависимости, связывающие между собой измеряемые величины».
3. Сформулировать как можно яснее связи между математическим выражением этой теории и фундаментальной наукой динамики, «чтобы мы могли до некоторой степени, определить тип «динамических явлений», которые могут послужить нам моделью для «объяснения или иллюстрации» электродинамических явлений».

Чтобы реализовать свою программу, он берет у Ампера, Гаусса, Вебера и Римана их закон взаимодействия точек, а у Фарадея мысль о том, что «электричество, присутствующее на сколь угодно малой поверхности проводника, подвергается воздействию силы, которая действует перпендикулярно этой поверхности и которую мы назовем электрическим напряжением». Как и Фарадей, он называет «силовой линией» траекторию, которую описывает точка, удаляющаяся от поверхности этого тела в направлении уменьшающегося напряжения. Он также принимает фундаментальную гипотезу Фарадея, согласно которой «электрическое напряжение существует не только на поверхности проводника, но и по всей длине силовых линий».

К этой мысли («душе» теории Фарадея) он добавляет новую: «Кроме напряжения, которое действует по длине всякой силовой линии, перпендикулярно этой линии, действует еще и давление». Более того, это давление равно по величине напряжению. Что же касается напряжения, «оно во всех точках аналогично тому, которое испытывает обычная веревка, за которую тянут».

Осталось только уточнить, из чего, по Фарадею, состоит среда, которая служит переносчиком этих силовых линий.

## Электричество по Максвеллу

Мы склонны думать, что глубокая бездна отделяет древних мыслителей от современных ученых, которые только и обладают научной истиной. Но давайте, чтобы лучше познакомиться со взглядами Максвелла, сравним его мысли о природе электричества с идеями Аристотеля о природе света.

Взяв идею математика Дени Пуассона, современника и друга Араго, согласно которой эта среда является «несжимаемой жидкостью», Максвелл, однако, вынужден провести различие между проводниками и изоляторами, которые он назовет (употребив термин Фарадея) «диэлектриками». Аристотель, говоря о свете, различает прозрачные тела, которые он называет «диафанами», и непрозрачные.

Максвелл предполагает, что несжимаемая жидкость Пуассона будет вести себя по-разному в проводниках и в диэлектриках (так же, как Аристотель, предполагавший, что свет ведет себя по-разному в прозрачных и непрозрачных телах) — в проводниках она ведет себя как инертная жидкость, которая, раз придя в движение, будет двигаться и дальше, тогда как в диэлектриках она ведет себя как жидкость упругая, и, при нарушении равновесия, будет стремиться его восстановить.

Когда на тело действует *электродвижущая сила*, возникшее напряжение действует различно на проводник и на диэлектрик. В проводнике несжимаемая жидкость поддается воздействию и возникает электрический ток; в диэлектрике ток возникнуть не может и сила порождает электрическое смещение. Это явление проявляется на мгновение в форме *тока смещения*. При таком определении электричества оно является не субстанцией (так же как у Аристотеля свет не являлся субстанцией), а измеряемым действием определенного напряжения жидкости, которое только и является реальным.<sup>21</sup>

В труде Максвелла 52 главы. В главе XX — одной из последних глав четвертой части — Максвелл внезапно обращается к проблеме света. Он отмечает, что между теорией электромагнетизма, которую он развил, и теорией волн Френеля существует связь.

Он поясняет: «При испускании света известное количество энергии затрачивается светящимся телом; если свет поглощается другим телом, это тело нагревается, а это показывает, что оно получило извне какую-то энергию. В течение промежутка времени, после того, как свет был испущен первым телом, и до того, как он достиг второго тела, энергия должна была существовать в промежуточном пространстве. Светоносная среда, следовательно, во время прохождения света через нее являетсяместилищем энергии [...] В теории электричества и магнетизма, принятой в этом трактате, рассматриваются две формы энергии: электростатическая и электрокине-



тическая, и эти формы энергии предполагаются находящимися не только в наэлектризованных или намагниченных телах, но в любой части окружающего пространства, где наблюдается действие электрической или магнитной силы. Таким образом, наша теория сходится с волновой теорией в допущении существования среды, которая способна стать вместилищем двух форм энергии».

Так мы попадаем в таинственную область электромагнитной теории света, с которой постепенно и познакомимся по мере изложения нашей истории.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>По-видимому, имеется в виду смола.

<sup>2</sup>Эрстед, К., *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, Копенгаген, 1820; Журнал химии и физики, т. 29, 1820, с. 275. Как правило, это открытие считают случайным. На самом деле, Эрстед сознательно стремился «продемонстрировать» свою теорию электрических столкновений.

<sup>3</sup>После этого он на несколько месяцев забросил занятия математикой и физикой, так как увлекся психологией и метафизикой.

<sup>4</sup>То, что мы теперь называем «проводником», в то время называлось «соединительной проволокой».

<sup>5</sup>Ампер А.-М. *Théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduites de l'expérience*, Записки Королевской академии наук, 1823 год, т. VI, с. 298.

<sup>6</sup>Термин «электромагнетизм» был широко употребим уже в то время и теперь невозможно установить, кто его ввел. Ампер писал «электро-динамический», с дефисом. Сейчас мы утратили эту привычку, и возможно, напрасно.

<sup>7</sup>Предки наших электронов.

<sup>8</sup>Ампер А.-М., *op. cit.*, с. 177.

<sup>9</sup>Ампер А.-М., *op. cit.*, с. 177.

<sup>10</sup>*Ibid.*, с. 325.

<sup>11</sup>Гаусс! В 1807 году барон фон Гумбольдт, друг Араго, собирался назначить Гаусса на должность директора Геттингенской обсерватории. Он спросил у Лапласа, кто, по его мнению, самый выдающийся математик Германии. Лаплас ответил: «Это Пфафф». Гумбольдт был поражен: «А как же Гаусс»? «Гаусс, — ответил Лаплас, — величайший математик мира». Цитируется по книге Э.Т. Белла *Великие математики*, изд. Раяут, 1939 г., с. 264.

<sup>12</sup>В честь Шарля Огюстена де Кулона (1736–1806), его открывшего.

<sup>13</sup>С точностью до множителя  $\sqrt{2}$  — дело просто в выборе единиц.

<sup>14</sup>Введенное Риманом понятие *потенциала* вместо *силы* предвосхищает в физике понятие поля и будет играть важную роль в дальнейшем изложении.

<sup>15</sup>На средства графа Девонширского, родственника Генри Кавендиша.

<sup>16</sup>Maxwell J.C. *A Treatise on Electricity & Magnetism*, 1873. (Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля, М. ГИИТ, 1952).

<sup>17</sup>*Ibid.*, p. v.

<sup>18</sup>Максвелл на протяжении ряда лет внимательно следил за работами Фарадея, как, впрочем, и Ампера. Его первая работа по электричеству, опубликованная в 1855 г., озаглавлена «О Фарадеевых силовых линиях».

<sup>19</sup>Согласно Максвеллу, «экспериментальные исследования, которыми Ампер установил законы механического взаимодействия между электрическими токами, являются одним из наиболее блестящих достижений науки». Но он отмечает, что «все совокупности, и теория и эксперимент, как будто появились в полной зрелости и в полном вооружении из головы «Ньютонова электричества». [...] Мы с трудом можем поверить, что Ампер в действительности открыл закон взаимодействия при помощи описываемых им экспериментов. Мы вынуждены подозревать, в чем, впрочем, признается сам Ампер, что закон открыт им при помощи некоего процесса, который он нам не показывает, и что когда была построена законченная теория, он удалил все следы лесов, при помощи которых здание теории было возведено. Фарадей же, напротив, все выставлял на обозрение — свои

ошибки, сомнения, ложные пути и увенчавшиеся успехом опыты. Из этого Максвелл делает такой вывод: «Каждому изучающему следовало бы читать исследования Ампера как блестящий образец научного стиля при изложении открытия, но ему следовало бы также изучать Фарадея для воспитания научного духа при той борьбе противоречий, которая возникает между новыми фактами, излагаемыми Фарадеем, и идеями, рождающимися в его собственном мозгу». Maxwell J.C. *A Treatise*, op. cit. II, § 528. (Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля, М. ГТТИ, 1952, с. 382).

<sup>20</sup> «*In his mind's eye*» — «Своим внутренним взором».

<sup>21</sup> Этот нюанс стоит проиллюстрировать на примере. Когда кто-то говорит «мое сердце переполняется радостью», это не означает, что радость есть некая субстанция, это значит, что человек находится в приподнятом настроении, характеризуемом словом «радость». Прежде чем расстаться с Аристотелем, посмотрим, как он подходил к вопросу о цвете. По его представлениям, у диафанов нет цвета — их цвет есть свет; цвет же рождается из союза света и тени на поверхности непрозрачных тел. Таким образом, цвет для непрозрачных тел играет ту же роль, что свет для диафанов. Практически в том же духе Максвелл полагает, что при наличии электрического смещения в диэлектрике некоторое «количество электричества поступает в диэлектрик».

# Идеи и люди

Математиками не становятся,  
математиками рождаются.

*Анри Пуанкаре, Ценность науки, 1905 г.*

## Знакомьтесь — Анри Пуанкаре

### Анри Жюль

Париж, 1854 год. Шарль Луи Наполеон, племянник Наполеона Бонапарта, старается закрепить последствия государственного переворота, в результате которого он стал новым императором Франции. В Берлине, Фридрих Вильгельм IV, готовится уступить свое место брату, который вскоре взойдет на прусский трон под именем Вильгельма I. В Лондоне королева Виктория, отметив свое тридцатипятилетие, собирается праздновать семнадцатую годовщину правления.

29 апреля в Нанси доктор Леон Пуанкаре, профессор факультета медицины, присутствует при рождении своего сына, и спустя два дня при крещении дает ему имя Анри Жюль.

С самого раннего детства у Анри был свой стиль поведения, который сохранился на всю жизнь, до последнего вздоха. Один из его одноклассников, будущий генерал Ксардель, так описал его: «Сколько раз после занятий часов в пять–шесть я заходил к нему, чтобы попросить разъяснить что-то непонятное мне и совершенно ясное ему в наших домашних заданиях, сколько раз я заставлял его разгуливающим взад и вперед по комнате матери, принимающим участие в разговоре, и, по-видимому, занятым чем угодно, кроме уроков. Затем внезапно он подходил к столу и, не садясь, поставив колено на стул, брал перо в левую или правую руку, ему было все равно в какую, писал несколько слов или строк, и снова начинал расхаживать по комнате и принимать участие в разговоре. После нескольких таких пауз уроки были сделаны, и сделаны превосходно».<sup>1</sup> В этот период маленький Анри был «нежен и очарователен, мил и любезен со своими товарищами».

Поступив в девятый (младший) класс лицея в Нанси, он быстро становится лучшим учеником. Лучше всего он учится по истории и географии. В четвертом классе он открывает для себя математику.

1870 год. В Париже толпа призывает к войне. Раздаются крики «На Берлин!». Третьего августа прусская армия входит во Францию. В следующем

году республиканское государство подписывает мир, подавляет Коммуну, восстанавливает порядок, уступает Эльзас и часть Лотарингии и смиряется с торжественным и символическим вступлением немецких войск в Париж.

Анри Пуанкаре шестнадцать лет. В ноябре в лицее он должен сдавать выпускные экзамены. Он опаздывает на экзамен по математике, неверно понимает задачу и получает ноль.<sup>2</sup> К счастью, у него уже была «неплохая репутация»: «Любой другой кандидат, проваливший экзамен по математике, не был бы пропущен», — сказал председатель комиссии при объявлении результатов.<sup>3</sup>

Осенью 1872 года, после победы над Францией, немецкие войска проходят по улицам Кенигсберга, легендарной столицы восточной Пруссии, которую тевтонские рыцари основали на Балтике после крестовых походов. Среди любующихся парадом мальчиков находятся двое, которые немного позже появятся в нашем рассказе. Воспользуемся случаем, чтобы познакомиться с ними.

Первому десять лет, это Давид Гильберт. Он вырос в добропорядочной протестантской семье, где ему внушили уважение к библейским законам и традиционные прусские ценности — аккуратность, умеренность, дисциплину, уважение к закону. Второму мальчику восемь лет. Его еврейская семья — из села Алексоты, рядом с Ковно (Каунасом). Чтобы спастись от преследований русской царской полиции, он только что вместе с родителями перешел границу между Эстонией и Пруссией. Его имя — Герман Минковский. Пуанкаре, Минковский, Гильберт. . . Пройдет четверть века и эти трое математиков сыграют решающую роль в формулировании теории относительности.

4 августа 1873 г. в Нанси начинаются письменные экзамены в Политехническую школу. В этот день старинная столица герцога Лотарингского Станисласа Лещинского ликует — повсюду в окнах вывешены французские флаги. После подписания мирного договора прусские войска оставили город! Поль Аппель, соученик Пуанкаре, который тоже сдавал экзамен, рассказывал, что поддавшись эмоциям, Пуанкаре что-то быстренько начертил тушью на бумаге, и не дожидаясь пока бумага просохнет, сдал свой лист: «Он спешил присоединиться к своей семье на площади Станисласа у мэрии, где должны были появиться французские войска».<sup>4</sup>

Профессора обеспокоены. Принимавший экзамен Абель Трансон говорил: «Нанси выставило превосходного кандидата. Но у нас возникли затруднения. По черчению он получил ноль, а получивший ноль не может быть принят. Во всем остальном ему нет равных. Если его примут, он будет первым, вот только примут ли его?»<sup>5</sup>

Приняли.

Он был первым по результатам экзамена по углубленному курсу математики в Нанси, и на экзаменах в Политехническую он тоже был лучшим, несмотря на конфуз с черчением. Профессора не захотели из-за пустяка лишиться такого студента.

Особенности характера новичка проявились очень быстро: «Иногда на переменах, — рассказывал его друг Поль Аппель, — он прогуливался по школьному двору, держа под руки двух приятелей, не вмешиваясь в их разговор и не участвуя в столь живых тогда дискуссиях. В другой раз он прогуливался в одиночестве, крутя, по своей привычке, на указательном пальце правой руки кольцо с ключами. Точно так же, прогуливаясь в за-

ле для занятий и крутя свои ключи, он повторял прослушанные лекции и прочитанные статьи».<sup>6</sup>

Лекции Пуанкаре не записывал. В первые дни он пытался на углубленном курсе математики делать записи. Он, как новичок, сидел в последнем ряду и его сокурсники видели, как он достал из кармана сообщение о похоронах вместо тетради. . . В следующие дни они с изумлением отметили, что он царапает по несколько строк все на том же листке, «который легко было узнать по траурной кайме». Однако скоро это закончилось. Пересев в первый ряд (он был немного близорук), Пуанкаре слушал профессоров со скрещенными на груди руками, ничего не записывая, усваивая все на ходу, без записей. Это поражало и смущало сверстников. «Из-за сдержанности и задумчивости его не понимал почти никто из однокурсников». И Поль Аппель добавляет: «Он жил слишком далеко и слишком высоко, и потому его не могли оценить в полной мере». Слишком далеко и слишком высоко. . .

На выпускных экзаменах в 1875 г., сдавая геометрию, он вновь продемонстрировал полную неспособность к черчению. Он попытался изобразить пересекающиеся прямые, но те не были ни пересекающимися, ни тем более прямыми. . . Это не понравилось экзаменатору Жюлю де ля Гурнери, и Пуанкаре получил второе место.

## Пуанкаре в Горном институте

Закончив Политехническую школу, Пуанкаре поступает на инженерный факультет в Горный институт, расположенный на бульваре Сен-Мишель в Париже. 2 августа 1876 г. он получает степень лиценциата наук в Сорбонне, затем проводит лето в Австро-Венгрии, где изучает эксплуатацию шахт и изготовление олова в Банате, а осенью возвращается в Париж. Изучать право в Париж приезжает и его двоюродный брат, шестью годами его младше, Раймон Пуанкаре (будущий президент Франции). Молодые люди живут в соседних комнатах в скромном доме в Латинском квартале в номере 4 у Одеона. Они охотно обедают вместе в пансионе Лавер на улице Серпан. В августе 1878 г. Раймон Пуанкаре сдает экзамены по праву, а затем получает степень лиценциата литературы на факультете в Нанси с оценкой «отлично». Ему восемнадцать лет.<sup>7</sup>

1879 год становится поворотным в карьере и жизни Анри Пуанкаре. 26 марта его назначают инженером шахт третьего класса и он поступает в распоряжение Службы контроля эксплуатации восточных железных дорог. Свои двадцать пять лет он отмечает 29 апреля в родной Лотарингии. Вернувшись в Париж в августе, он защищает в Сорбонне докторскую диссертацию. Председателем комиссии является уроженец Нима геометр Гастон Дарбу,<sup>8</sup> которому всего лишь тридцать четыре года (какие времена!).

11 августа Пуанкаре представляет в Парижскую Академию наук свою первую работу, а 24 ноября последовала вторая — «О некоторых свойствах квадратичной формы». Замечательная работа! Через несколько лет именно «квадратичная форма» даст ему один из ключей к разгадке относительности.

После перевода в министерство образования, он с 1 декабря обосновывается в Кане, на северо-западе Франции. 31 декабря, в последний день года, он заходит к своему другу Леону Ле Корню, тоже выпускнику Политехнической школы. «Он провел весь вечер, рассказывая по комнате, —

рассказывал Корню, — не слыша обращенных к нему слов и лишь изредка односложно что-то отвечая. . . Пробило полночь, и я решился осторожно напомнить ему, что мы уже в 1880 году. В этот момент он спустился на землю и решил отправиться домой. Через несколько дней, встретив меня на набережной, он между прочим сказал: «Теперь я умею интегрировать любые дифференциальные уравнения».<sup>9</sup>

Мы увидим, в какой шок привела эта безобидная фраза ученых во всем мире.

Ученики не в восторге от преподавания молодого Пуанкаре в Кане. «Он говорил запинаясь, — рассказывает Корню, — и не разъяснял того, что было интуитивно понятно ему самому. В этот период он был рассеяннее, чем обычно».<sup>10</sup> Голова его была занята большими проектами. Одним из них, и не последним, была женитьба. Он познакомился с правнучкой знаменитого зоолога Этьена Жоффруа Сент-Илера и испросил ее руки у отца, мсье Пулена д'Андеси, который с радостью дал согласие.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Darboux G., «Éloge historique d'Henri Poincaré», 1913, в *Œuvres d'Henri Poincaré*, Éditions J. Gabay, t. I, 1995, p. xi.

<sup>2</sup>Требовалось найти выражение для суммы  $1+n+n_2+n_3+\dots$ , где  $n$  есть положительное число, меньшее единицы. Обозначим искомую сумму через  $S$ .  $S = 1+n+n_2+n_3+\dots$ , что можно иначе записать как  $S = 1+n(1+n+n_2+\dots)$ , или  $S = 1+nS$ , откуда получаем  $S = 1/(1-n)$ .

<sup>3</sup>*Ibid.*, p. xvi.

<sup>4</sup>Appel P., *Henri Poincaré*, Plon, coll. «Nobles vies/Grandes œuvres», 1925, p. 26.

<sup>5</sup>Darboux G., *op. cit.*, p. xix.

<sup>6</sup>Appel P., *Henri Poincaré*, *op. cit.*, p. 26.

<sup>7</sup>В 1883 г. Раймон Пуанкаре защищает диссертацию, позднее опубликованную в виде статьи в журнале *La Revue libérale*. Эта статья, посвященная морали (или аморальности?) Эмиля Золя, удостоивается похвал. . . самого Эмиля Золя. Тот в восторге восклицал: «Подумать только — ведь ему всего 22 года! Такая зрелость в столь молодом человеке поражает. Я лично отвечу ему в журнале».

<sup>8</sup>По просьбе Дарбу, Пуанкаре должен был «слегка поправить и улучшить» свою диссертацию, что он и сделал, по словам Дарбу, «весьма охотно». Занятно, что эта диссертация подписана «А. Пуанкаре, горный инженер».

<sup>9</sup>Appel P., *Henri Poincaré*, *op. cit.*, p. 33.

<sup>10</sup>*Ibid.*, p. 33.

## Математики

### Принцип дуальности

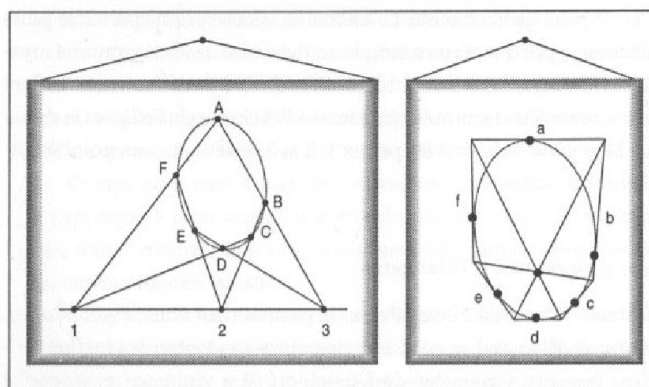
Исследования, которые Пуанкаре вел в Политехнической школе, в Горном институте и в университете Кана в 1874–1881 гг., считают обычно «чисто математическим анализом», областью достаточно абстрактной. Здесь мы посмотрим на них с другой точки зрения, чтобы понять, как эти работы подготовили его к «конкретному» участию в работе над теорией относительности. Это нетрудно — его работы большей частью связаны с «пространственными преобразованиями». Чтобы понять, что скрыто за этими словами, рассмотрим прежде всего первые работы, сделанные в этой области в XVII веке Блезом Паскалем.

Блез Паскаль (1623–1662) был сыном Этьена Паскаля, председателя суда присяжных в Клермоне (сегодня Клермон-Ферран). В 14 лет он вместе с отцом принимал участие в еженедельных дискуссиях, проводимых отцом Мерсенном, другом Декарта, с которым тот состоял в переписке. В возрасте 16–17 лет он сделал одно из своих самых замечательных открытий в математике, во всяком случае самое важное для продолжения нашей истории.

Представим себе эллипс (с. 24). Отметим на нем шесть произвольно расположенных точек  $A, B, C, D, E$  и  $F$ , в таком порядке. Прямые  $AB$  и  $DE$  пересекутся в точке 3. Прямые  $BC$  и  $EF$  пересекутся в другой точке 2. Наконец, прямые  $CD$  и  $FA$  пересекутся в третьей точке 1. Паскаль установил, что каким бы ни был эллипс, и где мы ни были на нем расположены точки  $A, B, C, D, E$  и  $F$ , все три точки 1, 2 и 3 всегда лежат на одной прямой! Это показалось ему настолько поразительным, что он назвал образованную шестью точками фигуру «мистической гексаграммой». В этой теореме нет никаких чисел — длина линий или величин углов не имеют значения. Именно в этом и смысл открытия. Именно этим, применяемая в теореме геометрия, коренным образом отличается от геометрии, изучавшейся греками — это не измерительная геометрия, а описательная.

Ее называли также «проективной» по следующей причине: представим себе конус света, выходящий из источника света  $O$ . Поставим на пути этого конуса света стеклянную пластину так, чтобы получить на ней эллипс. Нарисуем на этом эллипсе мистическую гексаграмму. Если поместить в конус вторую стеклянную пластину так, чтобы тень от гексаграммы падала на нее, то она образует на второй пластине гексаграмму, в точности совпадающую с первой. Это означает, что теорема Паскаля верна и при преобразовании конической проекции. Можно сказать, что это есть «инвариант конической проекции», в то время как при проективных преобразованиях метрические свойства не всегда остаются инвариантными.

Открытие Паскаля вспомнил полтора века спустя Жан Виктор Понселе (1788–1867), чью историю можно считать одной из самых удивительных. Окончив Политехническую школу и став офицером, он участвовал в войне Великой армии Наполеона с Россией. При переправе через Днепр в декабре 1812 г. он попал в плен, так как его оставили на поле сражения, решив, что он убит. Пять месяцев его в лохмотьях перегоняли с места на место и наконец заключили в тюрьму в Саратове, на Волге. Он был слишком измучен, чтобы размышлять, и ждал смерти, однако «роскошное апрельское солнце» придало ему бодрости, а поскольку делать ему было нечего, он начал



*Вписанная в эллипс «мистическая гексаграмма» Паскаля позволяет построить прямую 123, расположенную вне эллипса. Если в этом построении поменять местами точки и прямые (исходя из принципа дуальности), эта прямая 123 преобразуется в точку, находящуюся внутри гексаграммы, описывающей эллипс.*

восстанавливать в памяти то, что узнал в Политехнической школе из курса великого Гаспара Монжа.<sup>1</sup> Без учебников он вспоминает все что знал, и в порыве вдохновения продолжает работы Паскаля. Он создает «проективную геометрию». В сентябре 1814 г. его репатрируют во Францию, он привозит семь рукописей, написанных в тюрьме «вместе с другими сочинениями, старыми и новыми». В работе, которую он публикует в 1822 г., устанавливаются основы «принципа дуальности».

В геометрии на плоскости мы обычно говорим о точках и прямых. Мы говорим, что через «две разные точки  $A$  и  $B$  можно провести только одну прямую». Это другой способ сказать, что «две разные точки находятся на одной и только одной прямой». Понселе установил, что если в любом утверждении геометрии на плоскости, где речь идет о точках и прямых, поменять эти слова местами, утверждение остается верным. В приведенном выше примере (совершив перестановку и заменив «находятся» на «пересекаются»), получим: «Две разные прямые пересекаются в одной и только одной точке». Это и есть принцип дуальности. Читатель может проверить справедливость этого поразительного утверждения на теореме о мистической гексаграмме: вписанная в эллипс гексаграмма преобразуется в другую, описывающую эллипс, а прямая, на которой находятся точки 1, 2 и 3, становится точкой внутри эллипса.<sup>2</sup>

## Эрлангенская программа

В 1869 году, когда Пуанкаре еще учится в лицее в Нанси, в Париж, чтобы познакомиться с французскими математиками, приезжает молодой немец, уроженец Дюссельдорфа. Его зовут Феликс Клейн, ему двадцать лет. В Сорбонне он знакомится с Камилем Жорданом, одним из лучших европейских математиков. Молодого немца поражает метод подстановки, о котором ему рассказывает молодой француз. Этот метод есть продолжение работ Понселе, и в приложении к пространству позволяет выполнять преоб-



разования, применению которых, кажется, нет границ. . . Увы, война 1870 г. вынуждает Клейна вернуться в Германию. На следующий год его демобилизуют, и он становится приват-доцентом<sup>3</sup> в Эрлангене, городке в Баварии. В 1872 г. ему поручают выступить по случаю начала нового учебного года в университете. Он произносит речь — известную теперь как Эрлагенская программа — которая считается одним из величайших событий в истории математики. Познакомимся с некоторыми ее положениями.

Из принципа дуальности следует, что точке соответствует прямая, а прямой — точка. Это пример преобразования геометрических фигур. Более простой пример преобразования — точка, соответствующая другой точке. Его называют точечным. Если каждой точке пространства поставить в соответствие другую точку в том же пространстве, мы преобразуем пространство целиком и можно будет сказать, что мы достигли «точечного преобразования всего пространства».

Что интересного в преобразовании пространства? Клейн в своей Эрлангенской программе объясняет, что «наложение на пространство какого-либо числа преобразований всегда приводит к некоему изменению пространства».<sup>4</sup>

Ключевым в этой фразе является слово наложение: если применить к данному пространству одно преобразование, а затем, в результате этого преобразования применить еще одно, то происходит наложение двух преобразований.

«Теперь положим, что если в данном ансамбле преобразований любое преобразование, являющееся следствием наложения нескольких таких преобразований, также принадлежит к этому ансамблю, то оно образует группу преобразований». Мы лучше поймем, что он имеет в виду, пользуясь понятием группы, когда увидим как Пуанкаре, в свою очередь, использует его, создавая пространство-время. Пока же послушаем дальше Клейна: «Существуют такие преобразования пространства, которые оставляют вообще без изменения геометрические свойства пространственных образов. Геометрические свойства, по самому определению, не зависят от положения, занимаемого в пространстве изучаемым образом, от его абсолютной величины и, наконец, от ориентации в расположении его частей. [...] Отвлечемся теперь от материального образа, который, с точки зрения математики, несуществен, и тогда нам представится «многообразие точек» в разных измерениях. Тогда мы можем сформулировать следующую задачу: дано многообразие и в нем группа преобразований, требуется развить теорию инвариантов этой группы».

Понятие инварианта, так же как и понятие группы очень важны для нашего повествования и тесно связаны между собой: у всякой группы есть свои инварианты, соответственно, у каждого инварианта есть своя группа (а иногда несколько групп). Когда придет время, мы поймем весь смысл сказанного выше. Сейчас же остановимся лишь на этой мысли: «Клейн изобрел новый способ рассматривать геометрию». «Наука пространственных образов», которой была геометрия со времен античности, в одно мгновение становится «наукой преобразований пространства». Редко «взмах научной волшебной палочки» производил такой переворот!<sup>5</sup>

Пройдет всего лишь несколько лет и Пуанкаре покажет нам, в чем же он заключался.

## **Клейн испытывает потрясение... и впадает в депрессию**

Морозным февральским утром 1881 г. в Лейпцигском университете Феликс Клейн просматривает последний том французских Докладов Академии наук. Внезапно почва уходит у него из-под ног. В этом томе содержится работа на пяти страницах, которая относится к его любимой области — преобразованиям пространства! И в довершение всего, автор назвал свое открытие фуксовыми функциями «в честь господина Фукса, чьи работы были столь полезны в моих исследованиях».

Лазарус Фукс...<sup>6</sup> соперник Клейна!

Дальше — больше. Первая работа появилась 14 февраля,<sup>7</sup> вторая — 21 февраля, третья — 4 апреля, четвертая 18, а пятая 23 мая, шестая 30 мая, седьмая 25 июня, восьмая 11 июля... Все они подписаны именем, которое начинает угнетать Клейна — «Анри Пуанкаре».

Особенно выводит его из себя последняя работа. Начинается она иронически (или провокационно?) словами: «Замечание мсье Клейна, которое я процитировал в моей последней работе, заставило меня заняться исследованиями [...]».

Весной 1883 г. ко всеобщему изумлению становится известно, что Герману Минковскому, которому исполнилось восемнадцать лет,<sup>8</sup> Парижской Академией наук присужден главный приз по математике за работу, написанную на немецком.<sup>9</sup> Волнение, вызванное этим событием, было так велико — это был эквивалент Нобелевской премии (еще не существовавшей в то время), — что судья Гильберт посоветовал сыну держаться в стороне от этого юного дарования, столь скромного, но уже столь знаменитого. К счастью для нас, Давид Гильберт не послушался — Минковский стал его лучшим другом. К тому же, следующей весной в Кенигсберге появился еще один молодой математик...

Адольф Гурвиц (1859–1919), тоже рано развившийся, с мягким характером, превосходный пианист, был в 25 лет назначен экстраординарным профессором. Каждый день в пять часов Гурвиц, Гильберт и Минковский встречались в университетском саду под яблоней, чтобы обсудить свои идеи.

А тем временем в Лейпциге, Феликс Клейн мрачно наблюдает, как его любимая тема постепенно от него ускользает. Чтобы не отстать от Пуанкаре, он очертя голову бросается в погоню, которая так его взвинчивает... что вскоре ему приходится от нее отказаться. Целый год он пребывает в глубокой депрессии.<sup>10</sup>

В Кане у Пуанкаре все идет наоборот. Он находится в состоянии эйфории. Казалось бы, дуэль на расстоянии с Фуксом и Клейном должна была бы истощить его и поглотить все его время. Ничего подобного! За два года, которые он посвятил этим работам, он создал еще несколько математических инструментов, которые подготовили в других областях то, что некоторые современные физики называют «физикой XXI века».<sup>11</sup>

## **Пуанкаре интересуется аберрацией**

Через год Феликс Клейн совершенно выздоровел. Несмотря на неоднозначное отношение к Пуанкаре, он отправляет в Париж познакомиться с ним двух своих учеников (один из них — Давид Гильберт). «Французские

математики нас превосходят, — объясняет он. — Если мы хотим их обогнать, надо изучить их методы». <sup>12</sup> Гильберт пишет ему из Парижа: «Пуанкаре выражается ясно, немного быстро. На вид он очень моложав. Он кажется немного нервным и робким». <sup>13</sup>

Несколько месяцев спустя Клейну предлагают кафедру в американском университете Джона Гопкинса, от которой он отказывается, и место ординарного профессора в Геттингенском университете, которое он сразу же принимает.

Геттинген! Всего за несколько лет при финансовой поддержке богатых промышленников, в том числе Густава Круппа, Клейн и его товарищ по армии Фридрих Альтхоф, ставший покровителем немецких университетов, создают замечательную систему преподавания математики, которая сделает из этого маленького городка в центре Германии первый университетский центр мира.

Их методы могут сегодня показаться довольно тривиальными, но в то время они были новаторскими и даже революционными. Так, весь третий этаж центрального здания *Auditorienhaus* Клейн отводит для специально спроектированной библиотеки. Она станет известна как *Lesezimmer* (читалка) — впервые в истории европейских университетов книги в ней стоят на полках, они доступны студентам. И студенты могут ими пользоваться, когда захотят! Кроме того, в коридоре, который ведет в *Lesezimmer*, Клейн устанавливает уникальную в своем роде коллекцию «математических моделей», изготовленных им самим.

В Париже Пуанкаре сменяет знаменитого Липпмана на кафедре математической физики в Сорбонне. В следующем году его избирают членом Академии наук. Его назначение и выборы в Академию вызывают зависть у многих. Тем более, что свежее испеченному академику всего тридцать два года.

Для дебюта в Сорбонне он выбрал курс «Математической теории света», который закончил в 1888 г. докладом об астрономической аберрации. <sup>14</sup> Вначале он приводит разъяснение Брэдли, подчеркнув, что оно опирается на теорию, согласно которой свет состоит из «корпускул», распространяющихся по прямой линии с постоянной скоростью. Затем он замечает, что при применении волновой теории, геометрия этой задачи дает результат, несколько отличающийся от того, который получается при применении объяснения Брэдли. По Брэдли (см. с. 4), тангенс угла аберрации равен  $v/c$ . В этом выражении  $v$  есть скорость движения Земли по орбите, а  $c$  — скорость света. По волновой теории синус, а не тангенс угла аберрации равен  $v/c$ .

Пуанкаре отмечает, что аберрация крайне мала — всего лишь несколько угловых секунд, и разница между тангенсом и синусом соответствующего угла пренебрежимо мала. С этой точки зрения — и только с этой точки зрения — можно считать, что эти два метода дают одинаковый результат.

Он идет еще дальше в своем анализе, отмечая, что элементарное объяснение феномена волновой теорией предполагает, что эфир, содержащийся в телескопе, не участвует в движении Земли. Действительно, если бы эфир, содержащийся в телескопе, увлекался Землей, «скорость распространения света в телескопе была бы составляющей  $c'$  скорости  $c$  и скорости  $v$  увлечения упругой среды. С другой стороны, для наблюдателя, движущегося вместе с Землей, относительная скорость света будет равнодействующей  $c'$  и  $-v$ , т.е.  $c$ . Соответственно, аберрации не будет — вывод, противоречащий

опыту... Из этого можно сделать только один вывод — следует принять гипотезу о том, что эфир не увлекается движением Земли».

Итак, Пуанкаре показывает, что он не только, как Гаусс до него, был великим математиком — величайшим математиком своего времени — но он был еще и великим физиком.

На черной доске в Сорбонне он выводит для своих студентов уравнение, которое после уравнения Френеля станет вторым «релятивистским» уравнением в истории физики. И это весной 1888 г., за семнадцать лет до официальной формулировки теории относительности!

Выкладки очень просты, но, как и многие простые вещи, не без тонкостей. Пуанкаре рассматривает телескоп, наполненный водой. Предположим, что  $c$  это скорость света в воздухе,  $c'$  — скорость в воде,  $v$  скорость движения Земли. Скорость движения Земли крайне мала по сравнению со скоростью света, поэтому в расчетах<sup>15</sup> можно пренебречь членами, пропорциональными квадрату аберрации  $v^2/c^2$ .

Впервые в выкладках такого рода (затем этой идеей станут пользоваться все последователи Пуанкаре) он использует две системы отсчета: одну, неподвижно закрепленную в пространстве, и другую, увлекаемую движущейся водой. Скорость света в воде в неподвижной системе отсчета есть  $c'$ ; какова эта скорость в системе отсчета, вовлеченной в движение?

Отвечая на этот вопрос Пуанкаре следует методу параллелограмма сложения скоростей, использованному еще Эйлером. Он складывает скорость  $c'$  в неподвижной системе со скоростью увлечения эфира, т.к. предполагает, что свет распространяется в эфире. Вопрос в том, что следует принять за скорость увлечения эфира. Пуанкаре использует формулу Френеля — это главное в его рассуждениях — и поскольку она является *релятивистской* (чего пока никто не знает), его рассуждения оказываются правильными! По определению, скорость распространения света в воде равна  $c/n$ , где  $n$  — коэффициент преломления воды. Согласно формуле Френеля, *относительная* скорость увлечения эфира  $v'$  задается выражением  $v - (1 - 1/n^2)v$ , то есть она равна  $v/n^2$ , что дает  $v'/c'^2 = (v/n^2)/(c/n)^2 = v/c^2$ .

Удивительно! Отношение  $v/c^2$  сохраняет величину — остается *инвариантом* — при переходе из неподвижной системы в движущуюся. Этот замечательный и поразительный результат позволяет Пуанкаре сделать следующее заключение, которое тоже будет иметь фундаментальное значение для нашего рассказа. Повернувшись к своим студентам, Пуанкаре говорит: «Смысл предыдущей формулы в том, что на законы отражения и преломления, а также на интерференцию света движение Земли не влияет».

Как ни прост на первый взгляд этот вывод, благодаря ему мы узнаём что-то новое, что произведет революцию в физике и в наших представлениях о времени и пространстве: при рассмотренных приближениях «оптические явления могут продемонстрировать лишь относительные движения источника света и весомой материи по отношению к наблюдателю. Именно это и наблюдается при аберрации, когда наблюдатель и наблюдаемая звезда не вовлечены в одно и то же движение. Что имеет место также и в опыте Физо» [...].<sup>16</sup>

Эта краткая лекция в Сорбонне могла бы стать поворотным пунктом: Пуанкаре утверждает и доказывает с помощью несложной (но столь остроумно полученной) формулы, что ни одно оптическое явление никогда не даст возможности физикам продемонстрировать абсолютное движение

Земли в пространстве. Но именно это и вызовет у них наибольшее сопротивление.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Монж, граф Пелузский (1746–1818), сопровождал Наполеона в походе в Египет в качестве главы Культурного легиона.

<sup>2</sup>При переходе от геометрии на плоскости к геометрии в трех измерениях принцип дуальности связывает *точки* и *плоскости*; прямые при этом остаются прямыми.

<sup>3</sup>Так называлась должность, которую должны были занять новоиспеченные доктора наук в немецких университетах, прежде чем могли претендовать на должность экстраординарного профессора (примерно наш доцент), а затем ординарного (полного) профессора. Эта должность давала право преподавания в университете «частным образом», т.е. плату за лекции вносили слушатели; жалованья приват-доцент не получал. Студенты шутили, что экстраординарный профессор не знал ничего ординарного, ординарный профессор не знал ничего экстраординарного и только приват-доцент знал все.

<sup>4</sup>Klein F., *Le Programme d'Erlangen*, 1872. (Цитируется по: В.П. Визгин, *Эрлангенская программа и физика*, М. Наука, 1975).

<sup>5</sup>В 1872 г., когда Клейн выступил с Эрлангенской программой, ему было всего 23 года.

<sup>6</sup>Множество студентов работали над проблемой преобразования пространства с Фуксом в Берлине и с Клейном в Лейпциге, тогда как Пуанкаре в Кане был один. Более того, всю работу он проделывал в уме, записывая лишь конечные результаты, которые тут же отправлял в Академию наук, даже не перечитывая.

<sup>7</sup>Poincaré H., *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t.92, 1881, p. 333, 395, 859, 957, 1198, 1274, 1484; t.93, p.44.

<sup>8</sup>Он только что получил письмо от Камила Жордана, требовавшего от него «упорной работы, чтобы стать великим математиком». Reid C., Hilbert, New York, Springer-Verlag, 1996, p.12.

<sup>9</sup>При этом он извинился перед Академией наук, и надо сказать весьма дипломатично, за то что не успел перевести работу на французский. Он также предусмотрительно поместил в качестве эпиграфа двустилишие из Буало: «Лишь истина приятна, лишь истина прекрасна».

<sup>10</sup>Что, тем не менее, не помешало ему (так уж устроены математики) несмотря на расстроенные чувства написать небольшой трактат по икосаэдру – многограннику с 20-ю сторонами (из 20 равносторонних треугольников) – маленький шедевр чистой математики, который до сих пор считается классическим.

<sup>11</sup>См. Приложение.

<sup>12</sup>Reid C., Hilbert, *op. cit.*, p. 21.

<sup>13</sup>Письмо Гильберта Клейну, март 1886, *ibid.*, p. 23.

<sup>14</sup>Poincaré H., *Théorie mathématique de la lumière*, George Carré, éd., 1889. Переиздание J. Gabay, 1995.

<sup>15</sup>Не подозревая еще о далеко идущих последствиях, Пуанкаре провел различие, которому суждено было доминировать в физике на протяжении еще многих десятилетий: в некоторых вычислениях и в некоторых экспериментах важны лишь члены первого порядка (пропорциональные  $v/c$ ), в то время как в других необходимо принимать во внимание и члены второго порядка (пропорциональные  $v^2/c^2$ ), даже если они очень малы по величине.

<sup>16</sup>*Ibid.*, § 238.

## Тайна сгущается

### Неприятности Альберта Майкельсона

Одного из тех, кто упорно стремился доказать с помощью оптических методов движение Земли в эфире, звали Альбертом Майкельсоном. Он был на два года старше Пуанкаре. Родился Майкельсон в польской части Пруссии в 1852 г. и в раннем возрасте эмигрировал в Соединенные Штаты, где стал главным специалистом в области оптики. В 1885 г. он впал в депрессию, в следующем году пожар уничтожил его лабораторию в отделении прикладной науки в Кейзе, Кливленд, где он преподавал оптику. Майкельсон нашел приют у своего друга Эдварда Морли, профессора химии в университете Вестерн Ризерв.<sup>1</sup> В апреле 1887 г. Морли пишет отцу: «Мы с Майкельсоном поставили новый опыт — нам хотелось проверить, распространяется ли свет с одинаковой скоростью во всех направлениях».<sup>2</sup> Спустя три месяца он шлет лорду Рэлею, своему английскому ментору, обескураженное послание: «Мы закончили свой эксперимент. Результат несомненно отрицательный».<sup>3</sup> Друзья помещают результаты своих исследований в *American Journal of Science* в декабре 1887 г., а затем, спустя пятнадцать дней, чтобы быть уверенными, что их прочтут и в Европе, в *Philosophical Magazine* в Лондоне.<sup>4</sup>

Принцип их опыта был прост — он состоял в точном измерении времени, за которое луч света проходит расстояние туда и обратно между источником света и отражающим зеркалом, находящимся на расстоянии  $L$  от источника.

До этого замечательного опыта Майкельсон и Морли, как и другие физики, считали, что время прохождения пути будет разным, в зависимости от того, будет ли луч двигаться в том же направлении, что и Земля или же, напротив, перпендикулярно по отношению к движению Земли. Легко понять, почему они так считали.

Представим себе, что луч света — это маленький снаряд, летящий со скоростью  $c$ .

Операция первая — интерферометр расположен параллельно движению Земли, которая движется в пространстве со скоростью  $v$ . В то время, как снаряд летит к зеркалу со скоростью  $c$ , оно, увлекаемое движением Земли, удаляется от него со скоростью  $v$ . Это похоже на историю Ахиллеса и черепахи. Тогда, чтобы достичь зеркала, наш снаряд должен пролететь расстояние  $L + vt$ , а не только расстояние  $L$ . На обратном пути все обстоит наоборот — по мере того, как снаряд приближается к источнику света, тот приближается к снаряду. Расстояние, которое пройдет снаряд равно  $L - vt$ , а не  $L$ . Если мы сосчитаем время, нужное снаряду для того, чтобы пройти тот и другой путь, мы получим  $L/(c - v)$  в одну сторону и  $L/(c + v)$  в другую. Все время составит  $L/(c - v) + L/(c + v)$ , т.е.  $2L/(1 - v^2/c^2)$ .

Операция вторая: интерферометр расположен перпендикулярно к предполагаемому движению Земли. В этом случае, путь в один и в другой конец располагаются на одном расстоянии, которое легко рассчитать с помощью теоремы Пифагора. Результат будет равен  $2L/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Путь теперь не равен, как раньше,  $2L/(1 - v^2/c^2)$ , его следует умножить на  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . (Отметим, что этот множитель привносит член, который зависит от квадрата абберации. Мы упоминаем о нем потому, что в дальнейшем он сыграет фундаментальную роль в нашем рассказе.)

Интерферометр Майкельсона был достаточно чувствительным, чтобы измерить фактическую разницу в длине двух путей, вычисленных выше, как бы мала она ни была. Судите же сами, как поражены и разочарованы были наши ученые, увидев, что их прибор, несмотря на свою превосходную конструкцию и калибровку, не зарегистрировал ни малейшей разницы!

## Совпадения

Через несколько месяцев ирландский физик Джордж Фрэнсис Фицджеральд (1851–1901) берется истолковать опыт Майкельсона и Морли. Он замечает, что его отрицательный результат можно объяснить, если предположить, что все тела, движущиеся со скоростью  $v$ , подвержены сокращению по направлению своего движения пропорционально коэффициенту  $\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$ . Фицджеральд объясняет эту простую, но смелую гипотезу в письме, которое отправляет в 1889 году в американский журнал *Science*, где оно тут же и было опубликовано.<sup>5</sup> В связи с финансовыми трудностями журнал после опубликования письма некоторое время не издавался, и Фицджеральд, решив, что его письмо не опубликовано, о нем забывает. Спустя три года голландский физик Хендрик Антон Лоренц (1853–1928), который не знает об этом письме Фицджеральда, находит то же объяснение. Через два года, узнав, что Фицджеральд сделал это открытие до него, он сразу же публично признает его приоритет и воздает ему должное. Однако все осложняется, когда Фицджеральд, который продолжает верить в банкротство журнала *Science*, настаивает на том, чтобы отдать приоритет Лоренцу... который от него отказывается.

Все эти проблемы первенства меркнут по сравнению с тем, что происходит почти в то же время в Геттингенском университете. Физик Вольдемар Фогт (1850–1919), современник Пуанкаре (и, соответственно, Майкельсона), заинтересовался другой проблемой, связанной со светом — эффектом, открытым Физо, и ставшим широко известным благодаря Доплеру. По Доплеру, частота волны увеличивается (или уменьшается), при движении источника по отношению к наблюдателю. Он предлагает более точное объяснение этого явления и, чтобы осуществить эту программу, предлагает уравнение волны<sup>6</sup> для случая, когда источник и наблюдатель неподвижны по отношению к друг другу, а также для неподвижного наблюдателя и источника, который движется по отношению к нему со скоростью  $v$ .

Его ждет неприятный сюрприз: уравнения не совпадают.

«Уравнение — это всего лишь уравнение», — говорит себе Фогт. Если оно меняется каждый раз, когда мы переходим от одной системы отсчета к другой, то явление, которое оно описывает, не соответствует никакой физической реальности и является чистым вымыслом, иллюзией, зависящей от точки зрения, на которой мы стоим, чтобы наблюдать природу, короче, чистым миражом. С пугающей легкостью Фогт открывает, что уравнение волны сохраняет ту же форму, если заменить переменные  $x$  и  $t$ , означающие пространство и время, переменными  $x = k(x - vt)$  и  $t = k(t - vx/V^2)$ , где  $v$  есть скорость перемещения источника,  $V$  скорость распространения волны, а коэффициент  $k$  равен  $1/\sqrt{(1 - v^2/V^2)}$ . Когда изучаемое явление является светом (а не, например, звуком), то есть  $V = c$ , коэффициент  $k$  и становится «сокращением» Фицджеральда», о котором Фогт, естественно, не знал!

Все это так, но замена переменных, которую он таким образом ввел, представляется Фогту всего лишь вычислительным ухищрением, чье единственное предназначение состоит в сохранении в неприкосновенности волнового уравнения, которому иначе придется описывать мираж. Он действительно не понимает, как такая чисто математическая процедура может представлять какой-либо интерес с точки зрения физики.

Эти сомнения не мешают ему использовать свой новый подход, чтобы выдвинуть новую теорию принципа Доплера... которая превосходно работает. Он описывает замену переменных и свое применение принципа Доплера в статье «*Über das Doppler'sche Prinzip*», которая появляется в 1887 году в *Göttinger Nachrichten*, журнале Геттингенского университета.<sup>7</sup> Статья прошла совершенно незамеченной. А между тем открытие Фогта явилось тем, что через несколько лет назовут ключиком к ларцу теории относительно-сти — преобразованиями... Лоренца.<sup>8</sup>

## В дело вмешивается электрон

В 1892 году, четыре года спустя, Лоренц, который уже промелькнул в нашем рассказе, выдвинул теорию электрона.

Лоренц родился в Арнеме, маленьком голландском городке на Рейне. От отца он унаследовал поразительную память — эта черта роднила его с его современником Анри Пуанкаре. У него был живой и пронизательный взгляд, он часто улыбался. Лоренц бегло говорил на нескольких языках. Кроме голландского он владел французским, английским и немецким.

В своей первой большой работе «*Электромагнитная теория Максвелла и ее приложение к движущимся телам*»,<sup>9</sup> опубликованной на французском в 1892 г., он представляет набросок того, что потом станет теорией электрона.

Мы видели, что в предисловии к своему трактату Максвелл отметил настоятельную необходимость связать плодотворные идеи математиков с идеями Фарадея, порожденными его опытами.<sup>10</sup> Он процитировал работы Лапласа, Пуассона, Гаусса, Вебера и Римана, которые были основаны на теории действия на расстоянии, зависящего либо от относительного движения корпускул, либо от передачи потенциала или силы от одной корпускулы к другой, и взбунтовался против такого взгляда, предпочтя ему концепцию Фарадея, основанную на силовых полях. Он, впрочем, признавал, что концепция наэлектризованных корпускул также имеет свои достоинства.

Лоренц придерживается того же мнения. Ревностный сторонник Максвелла, он задается целью примирить его точку зрения с идеями Гаусса, Вебера и Римана. Решительно приняв теорию Максвелла за основу, он вводит в нее одно новшество — утверждает, что магнитное поле, описываемое уравнениями Максвелла, создается в пространстве электрически заряженными корпускулами, беря, таким образом, сторону Гаусса, Римана и Вебера. Своим корпускулам он дает название «электронов». Это название сохранится, однако не следует заблуждаться на сей счет: идея существования наэлектризованных корпускул в природе не нова, и шаги, предпринятые Лоренцем, прекрасно вписываются в следующее высказывание Максвелла: «С философской точки зрения чрезвычайно важно сравнение двух методов, при помощи которых удалось объяснить основные электромагнитные явления и фактически вычислить скорость его распространения, в то время



как основные концепции фактического существования явлений в обоих методах существенно различны».

Хотя демарш Лоренца нельзя назвать ни новым, ни несовместимым со взглядами Максвелла, в нем есть все же нечто свое, а именно то, что он пытается объединить два столь казалось бы различных подхода.

Сейчас мы поближе познакомимся с теорией электрона. Посмотрим, как Лоренц попытался для начала ее применить — он хотел объяснить, почему работает формула Френеля.

Эта первая попытка чуть не закончилась нервным срывом. 18 августа 1892 г. он пишет лорду Рэлею: «Гипотеза Френеля [о неподвижном эфире] вместе с его формулой  $1 - 1/n^2$  коэффициента частичного увлечения эфира превосходно описывала бы все наблюдаемые оптические явления, если бы не результат опыта Майкельсона[...], который противоречит взглядам Френеля. Я чувствую, что не могу объяснить это противоречие, но все же считаю, что если мы откажемся от теории Френеля, у нас не будет ни одной подходящей теории, которая сможет ее заменить, т.к. те два условия, которые г-н Стокс считает совершенно необходимыми для своей теории движения эфира, абсолютно несовместимы»<sup>11</sup> (там же, с. 19).

Он добавляет — и в этом проявляется его творческий подход — «я нашел единственный способ примирить эти отрицательные результаты с теорией Френеля. Можно предположить, что прямая, соединяющая две точки твердого тела и параллельная направлению движения Земли, будет иметь другую длину при повороте на  $90^\circ$ ».

Мы видим, что Лоренц идет по следам Фицджеральда и Фогта... Тем более, что для реализации своей идеи он изобретает прием, странным образом напоминающий тот, которым воспользовался четырем годами ранее Фогт, и который тот отложил подальше, посчитав его слишком... математическим. Этот прием, который составляет основу всех попыток объяснить электрон, пространство и время в тот период развития физики, станет отправным пунктом работ Пуанкаре и Эйнштейна по теории относительности. Нам следует ознакомиться с ним подробнее.

## Лоренц предлагает странный способ описания электрона

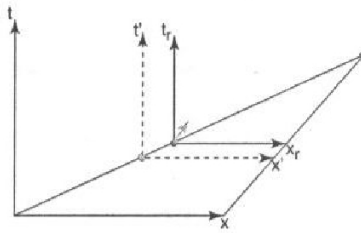
Мы видели, как Фогт открыл замену переменных, при которой волновое уравнение сохраняет свой вид. Лоренц занялся той же проблемой.

В то время у каждого были свои предпочтения в выборе символов. Мы примем одинаковые обозначения для всех связанных с относительностью работ, с которыми нам предстоит ознакомиться.

Для начала введем две координаты — одну для пространства, назовем ее  $x$ , другую — для времени, назовем ее  $t$ .

Почему же у пространства всего одна координата, если у него три измерения? Потому, что нас интересует лишь направление предполагаемого движения Земли в эфире. Только в этом единственном направлении происходит то, что нас будет интересовать; оно будет нашей осью  $x$ . Мы оставим в стороне два других измерения, которые математики обычно обозначают  $y$  и  $z$ .

Лоренц рассматривает отдельный электрон, находящийся где-то в эфире. Чтобы описать движение этого электрона, он предлагает три системы



Для описания движущегося электрона Лоренц использует три системы координат, которые он называет абсолютной  $[x, t]$ , относительной  $[x_r, t_r]$  и мнимой  $[x', t']$ . «Преобразования» или «замены переменных», позволяющие переходить от одной системы координат к другой, и есть тот исторический вклад, который внес Лоренц в создание теории относительности.

координат, каждой из которых дает свое название. Почему три, а не две, как предлагал Фогт?

Лоренц рассматривает первую систему, координаты  $x, t$  которой называет *абсолютными*. Он рассматривает их, как неподвижные координаты в эфире. Затем он вводит вторую систему с *относительными* координатами  $x_r, t_r$ . Он полагает их координатами системы, увлекаемой Землей при ее движении в эфире. Наконец, он рассматривает третью систему, координаты  $x'$  и  $t'$  которой называет *мнимыми*. Он предполагает, что она привязана к электрону, независимо от того, неподвижен ли он в эфире или движется. Иначе говоря, электрон повсюду тащит за собой мнимые координаты, как улитка свой домик.

Лоренц решает использовать эти мнимые координаты для расчетов в системе, где электрон совершенно неподвижен, а затем вернуться к абсолютным координатам, чтобы получить окончательный желаемый физический результат.

Главная проблема заключается в том, как перейти из одной системы координат в другую так, чтобы всегда можно было вернуться назад. Чтобы все усложнить, Лоренц проходит этот путь с конца:

1. Сначала он определяет, как перейти от абсолютных координат к относительным, положив  $x_r = x - vt, t_r = t$  (что соответствует принципу относительности Галилея);<sup>12</sup>
2. Затем он переходит от относительных координат к мнимым, положив  $x' = kx_r, t' = t - k^2 vx_r/c^2$ , где  $k = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ .

Два первых уравнения показывают нам, что при переходе от абсолютных к относительным координатам... не происходит ничего необычного (почему и неясно, зачем Лоренц сохранил этот этап в своих рассуждениях). Зато два следующие уравнения, позволяющие перейти от относительных к мнимым координатам, исключительно интересны. Они показывают, что при этом переходе координата пространства испытывает сокращение в направлении поступательного движения, и что координата времени тоже претерпевает изменение. Время в мнимой системе Лоренц назовет «местным временем».

Эти уравнения, пока столь несовершенные, есть, тем не менее, отправной пункт на пути к тому, что станет в конце концов теорией относительности. Сейчас мы не станем анализировать все, что из них вытекает. Пока что посмотрим на два неожиданных следствия, к которым они приводят.

Первое можно назвать приятным — гипотеза сокращения длины, выраженная уравнением  $x' = kx$ , дает удовлетворительный результат, если применить его к аберрации. При малых значениях  $v/c$  уравнения позволяют вернуться к формуле частичного увлечения Френеля!

Второе не столь приятно: представим себе луч света, распространяющийся со скоростью  $c$  в направлении  $x$ . Какова его скорость в мнимой системе? Перейдя от абсолютных координат к мнимым — от  $x$  и  $t$  к  $x'$  и  $t'$ , Лоренц получает<sup>13</sup>  $x' = ct'/k$ . Скорость света в мнимой системе будет равна  $c$ , только если положить  $k = 1$ , то есть пренебречь членами аберрации второго порядка  $v^2/c^2$ . Этот результат задает нам задачу.

В статье, которую вскоре публикует Лоренц,<sup>14</sup> он пытается оправдать свой подход следующим образом: «Что определяет размер и форму твердого тела? Естественно, межмолекулярные силы. Любая причина, которая изменит эти силы, повлияет и на размер, форму и объем [твердого тела]». Он формулирует свою «гипотезу межмолекулярных сил». Она предполагает, что силы, определяющие форму твердых тел, тоже действуют через посредство эфира и, следовательно, на них влияет движение в эфире согласно гипотезе «сокращения» длины.

## Лоренц изобретает *electrische Kraft*

Не удовлетворившись полученным результатом, Лоренц в следующем году публикует улучшенную версию своей теории. Работа, в которой он ее описывает, как правило упоминается под названием *Versuch*<sup>15</sup> (начало ее заглавия) и содержит два исторических открытия.

Представим себе, что во всей Вселенной есть один-единственный электрон, погруженный в электромагнитное поле, подчиняющееся уравнениям Максвелла. Поскольку электрон имеет заряд, он испытывает воздействие этого поля в виде силы, которую Лоренц назвал *electrische Kraft* (электрической силой). Сегодня мы знаем ее под именем «силы Лоренца». Этот голландец не удовлетворяется тем, что дал имя этой силе, он посвящает ей формулу. Чтобы понять роль, которую она сыграет в физике, познакомимся с некоторыми понятиями теории электрона.

Для Лоренца, как и для Максвелла, электромагнитное поле становится определенным в каждой точке пространства, если этой точке приписано значение напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  и магнитного поля  $\mathbf{B}$ . *Electrische Kraft* Лоренца имеет две составляющие. Первая — это  $\mathbf{E}$ ; вторая — менее очевидная — появляется только когда электрон находится в движении. Пусть его скорость есть  $\mathbf{v}$ . Если направление  $\mathbf{v}$  перпендикулярно  $\mathbf{B}$ , то вторая составляющая равна нулю; если направление  $\mathbf{v}$  параллельно  $\mathbf{B}$ , то ее величина максимальна и равна  $vB$ . Если между  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$  есть угол  $\varphi$ , то ее величина есть  $v \cdot B \cdot \cos(\varphi)$ . Полная формула теперь записывается в символическом виде  $\mathbf{F} = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , где знак векторного умножения  $\times$  резюмирует все, что мы только что объяснили.

Теория электрона, в которой поначалу содержались лишь четыре уравнения теории Максвелла, теперь обогатилась пятым, которым задается ве-

личина и направление силы Лоренца. Эта сила, как мы отметили, содержит одну составляющую, которая ощущается электроном только, когда он находится в движении. В движении по отношению к чему? В этом вся загвоздка.

Я нахожусь на Земле и наблюдаю электрон. По отношению ко мне он неподвижен, а по отношению к эфиру? Да — если Земля неподвижна по отношению к эфиру. Нет — если Земля движется по отношению к эфиру. На первый взгляд ничего сложного тут нет.

В параграфе 89 своей работы Лоренц объясняет: «Как первым заметил Максвелл, время, за которое луч света проходит расстояние от точки  $A$  до точки  $B$ , а затем возвращается к точке  $A$ , должно быть различным, если две точки перемещаются вместе, не увлекая с собой эфир. Это различие второго порядка величины [то есть пропорционально  $v^2/c^2$ ], но оно достаточно велико, чтобы его можно было обнаружить с помощью чувствительного прибора». Затем он описывает опыт Майкельсона и Морли, подчеркивает важность его отрицательного результата и спрашивает: «Позволяет ли этот результат утверждать, что эфир движется вместе с Землей и что, соответственно, теория абберации Стокса верна»? И сам отвечает: «Трудности, с которыми сталкивается эта теория при объяснении абберации, кажутся мне слишком серьезными, чтобы я мог с ней согласиться. Лично я предпочитаю попытаться примирить противоречие между теорией Френеля и результатом Майкельсона».

Чтобы достичь этой цели, он применяет метод «замены переменных», который придумал тремя годами раньше. Он немного изменяет этот метод и переходит от абсолютных координат к относительным, положив  $x_r = x - vt$ ,  $t_r = t - vx/c^2$ , а затем переходит от относительных к мнимым координатам, положив  $x' = kx_r$ ,  $t' = t_r$ . Мнимое время он теперь называет «местным временем».

Оставим пока что эти рассуждения — мы встретимся с ними еще раз в улучшенном виде в 1904 г. у Лоренца, а затем в 1905 г. — у Эйнштейна.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Говорят, что Майкельсон был неплохим скрипачом, а Морли — пианистом. Похоже, что интерес к звуковым волнам повлиял на их решение заняться волнами световыми. См. *Physics Today*, May 1987, p. 28.

<sup>2</sup>Morley E.W., "Letter to S.B. Morley", 17 апреля 1887 г., в *Science in Nineteenth Century America*, New York, Hill and Wang, 1964, p. 312.

<sup>3</sup>Michelson A.A., "Letter to Lord Rayleigh", 17 августа 1887 г., *American Journal of Physics*, vol. 32, 1964, p. 32. См. также *Physics Today*, op. cit., p. 56.

<sup>4</sup>Michelson A.A., Morley E.W., *American Journal of Science*, vol. 34, 1887, p. 333; *Philosophical Magazine*, vol. 24, 1887, p. 449.

<sup>5</sup>Fitzgerald G.F., *Science*, vol. XIII, 1889, p. 390. История идеи сокращения длины разворачивалась в нескольких эпизодах. Предложенная Фицджеральдом в 1889 г., она перекочевывала из одного семинара в другой в течение ряда лет. Оливер Лодж прямо упоминает о ней как предложенной Фицджеральдом в своей работе *Aberration Problems*, опубликованной в 1893 г. (*Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 184, 1893, p. 749). Жозеф Лармор поступил так же в своей работе *Aether and Matter* в 1900 г.

<sup>6</sup>В сокращенном виде волновое уравнение записывается так:  $c^2 \nabla^2 a = \partial^2 a / \partial t^2$  (см. прим. 8 на с. 7). Определим, следуя Фогту новую  $\nabla^2$ , которую обозначим  $\nabla'^2$ . Затем заменим в волновом уравнении  $\nabla^2$  и  $t$  на  $\nabla'^2$  и  $t'$ . Несложные преобразования показывают, что после замены переменных волновое уравнение приобретает вид  $c^2 \nabla'^2 a = \partial^2 a / \partial t'^2$ .

Итак, преобразованное уравнение имеет в точности тот же вид, что и исходное. Этот искомый Фогтом результат и оправдывает вид его уравнений при замене переменных. Отметим, что в обеих системах Фогт интуитивно использует для скорости света  $c$  одну и ту же величину. Далее мы увидим, какое необычайное значение имеет эта деталь.

<sup>7</sup>Voigt W., *Göttinger Nachrichten*, 1887, p. 41.

<sup>8</sup>На конференции в Колумбийском университете в Нью-Йорке в 1906 г. Лоренц, в частности, сказал: «В статье, опубликованной в 1887 г. и, к большому сожалению, не попавшей в поле моего зрения за все эти годы, Фогт применил [к уравнениям распространения электромагнитных волн] преобразования, эквивалентные полученным мной. Идея [таких] преобразований может, таким образом, быть заимствована из работы Фогта, равно как и доказательство того, что они не изменяют вида уравнений». Lorentz H.A., *The Theory of Electrons*, 1906, цитируется по А. Пайс, *Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*, М. Наука, 1989, с. 119. Лоренц проявил себя настоящим джентльменом – «человеком безупречного поведения». Похоже, что работа Фогта не попала на глаза и Пуанкаре. Вполне вероятно, что если бы он знал об этой работе, он предложил бы название «преобразования Фогта», а не «преобразования Лоренца», как он сделал в 1905 г. Возможно, это пошло бы на пользу истории физики, ведь тогда она больше соответствовала бы истине, что всегда желательно. Заметим, что введенная Фогтом замена переменных влияет лишь на переменные пространства и времени, входящие в волновое уравнение. Электродинамика при этом совершенно не затрагивается.

<sup>9</sup>Lorentz H.A., “La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants”, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, vol. XXV, 1892, p. 363–551.

<sup>10</sup>Maxwell, *Treatise...*, op. cit., p. x.

<sup>11</sup>Lorentz H.A. «Письмо лорду Рэлею», 18 августа 1892 г., цитируется в R.S. Shankland, *Isis*, vol. 59, 1967, p. 86.

<sup>12</sup>У Ньютона принцип относительности Декарта и Галилея относится исключительно к движению тел по отношению к друг другу. Он соответствует высказыванию Галилея о том, что совместное движение нескольких тел *é com nullo* – не производит эффекта. О том же писал и Декарт на полях своей рукописи *Principes de la philosophie*: «Когда говорят, что одно тело движется, а другое покоится, то это движение лишь относительно и зависит от нашего способа восприятия». Это одно из первых употреблений слова «относительно» в философии. Пуанкаре, вполне уместно, именует это «принципом относительности движения».

<sup>13</sup>Объединяя приведенные в тексте уравнения, для перехода от мнимых к абсолютным координатам получаем:  $x = kx' + vt'$ ,  $t = t' + kvx'/c^2$ , что дает  $x' = ct'/k$ .

<sup>14</sup>Lorentz H.A., “The Relative Motion of the Earth and the Ether”, *Verslaagen Koninklijke Akademie van wetenschappen te Amsterdam*, vol. I, 1892, p. 74.

<sup>15</sup>Lorentz H.A., *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Leiden, Brill, 1895.

## *Umwälzung!*

### Пуанкаре читает курс по теории Лоренца

В 1899 г. Пуанкаре преподавал в Сорбонне теорию Лоренца. В конце лекций он поделился со студентами своими размышлениями, касающимися дополнительной гипотезы Лоренца, согласно которой длина всех тел будет сокращаться в направлении движения Земли:

«Это странное свойство представляется прямо-таки трюком, к которому прибегает природа, чтобы не дать обнаружить абсолютное движение Земли в оптических явлениях. Меня это не удовлетворяет и я должен высказать то, что чувствую — мне кажется вполне вероятным, что оптические явления зависят только от относительного движения присутствующих материальных тел, источников света или оптических приборов, и что *они справедливы не с точностью порядка квадрата или куба аберрации, а строго*».<sup>1</sup>

И далее он предсказывает:

«По мере того, как опыты будут становиться более точными, этот принцип будет проверяться со все большей точностью [...] Понадобится ли в каждом случае новый трюк, новая гипотеза при каждом приближении? [...] Конечно, нет. Хорошая теория должна позволять продемонстрировать основной принцип сразу и совершенно строго. Теория Лоренца пока что этого не достигла, но она ближе всех других подходит к поставленной цели. Можно надеяться, что удастся превратить ее в совершенно удовлетворительную теорию, не внося слишком существенных изменений». Хорошая теория...

Возможно, он уже тогда подозревал, что именно ему суждено пять лет спустя совершить это чудо?

### Новые веяния в физике

14 апреля 1900 г. президент Франции Эмиль Лубэ торжественно открывает Парижскую всемирную выставку. 6 августа, также в Париже, Пуанкаре открывает Математический конгресс, на который его стараниями собралась мировая элита. Попеременно с этим проходят заседания Физического конгресса, генеральным секретарем которого является он же. Пуанкаре просит коллег написать несколько работ, которые можно было бы преподнести Лоренцу.

11 декабря 1900 г. эти работы были изданы в *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* и заняли 600 страниц! Посвящались они 25-летию со дня опубликования Лоренцем его докторской диссертации.

В сборнике выделяются две статьи. Одна принадлежит физику Вильгельму Вину, которому всего 36 лет, другая — Пуанкаре. Вин, который одиннадцать лет спустя получит Нобелевскую премию, выступает за отмену старого механистического взгляда на физику в пользу нового электродинамического подхода.

Механистический подход является, в основном, подходом Декарта (развитым Ньютоном), согласно которому всякое тело имеет массу. Если тело находится в движении, оно обладает некоторым импульсом, пропорциональным его массе. В такой концепции масса является фундаментальной величиной, настоящей основой — она представляет «сумму всех частей, из

которых состоит тело» и, как следствие, остается неизменной независимо от того, движется тело или остается в покое.

Вин предлагает взглянуть на Вселенную, опираясь на новую гипотезу о природе и происхождении массы. В основе его картины мира, *Weltbild*, лежат два фундаментальных элемента — электрон и эфир. Законы, управляющие Вселенной, отныне не должны быть просто законами механики, они должны иметь электродинамический характер. Необходимо уточнить эти новые законы, а затем вывести из них механические.

Этот подход воспламеняет умы. Он вызывает настоящую революцию в научной мысли Европы. У студентов немецких университетов на устах одно слово — *Umwälzung* — долгой избитые истины!

Вернемся ненадолго в прошлое. . .

В 1842 г. ирландский физик Джордж Габриэл Стокс — автор теории-соперника Френеля — изучает (теоретически) движение сферы массой  $m$  с постоянной скоростью  $v$  в несжимаемой жидкости. Он показывает, что все происходит так, как если бы масса этой сферы возрастала на небольшую величину  $m'$ , которую он называет индуцированной или гидродинамической массой, зависящей как от радиуса сферы, так и от плотности жидкости, в которой она движется.

В 1881 г. сэр Джозеф Джон Томсон (1856–1940) применяет метод Стокса к изучению электрически заряженной сферы, которая движется в среде с индуктивностью  $K$ . Он обнаруживает, что при малых скоростях все происходит так, как если бы масса сферы возрастала на величину  $\mu$ . Вернувшись к этой задаче спустя восемь лет, Оливер Хевисайд показал, что формула для  $\mu$  усложняется, если принять в расчет эффекты, зависящие от отношения  $v/c$  — скорости сферы к скорости света.

Сэр Джозеф возвращается тогда к своим первоначальным расчетам. Знает ли он в это время о сокращении Фиддджеральда и преобразовании Фогта? Как бы то ни было, он заново открывает суть дела! Свой анализ он излагает в статье *Notes on Recent Researches on Electricity and Magnetism*. Г. Сирл в 1896 г. и сэр Артур Шустер в 1897 г. его подтверждают.

Во всем этом есть что-то сюрреалистическое в прямом значении этого слова — «за пределами реальности». Ведь до сих пор все считали, что масса тела есть неизменная характеристика тела, в некотором роде смысл его существования. И вдруг Стокс, Томсон и Хевисайд утверждают — и приводят доказательства — что эта масса может изменяться и может быть не чисто механического происхождения!

Прочтя работу Вина, Лоренц одним из первых присоединяется к новаторам. Одну за другой он публикует несколько работ того же направления, хотя и оставляет за собой право считать, что хотя бы какая-то часть массы может иметь механическое происхождение.

## Пуанкаре критикует Лоренца. . .

Статья Пуанкаре, написанная для этого сборника в честь Лоренца, очень необычна. Открывается она замечанием философского характера: «Может показаться странным, что в сборнике, посвященном Лоренцу, я вынужден вернуться к возражениям, уже высказанным против его теории в другом месте. Но, поспешу добавить, *хорошие теории уязвимы* [курсив Пуанкаре]. Против них тут же высказываются всяческие возражения; те из теорий, что

глубоки, огрызаются и в конце концов оборачиваются триумфом, но видоизменившись». И делает следующий вывод: «Возражения не принижают такую теорию, поскольку они позволяют обратить ей на пользу ее скрытые достоинства. К таким теориям, несомненно, принадлежит теория Лоренца».

Вся статья посвящена одной проблеме, которую Пуанкаре формулирует так: «В теории Лоренца принцип равенства действия и противодействия не соблюдается, по крайней мере, когда он применяется только к материи».

Пуанкаре предлагает следующее решение: «Можно рассматривать электромагнитную энергию, как фиктивную жидкость, распространяющуюся в пространстве согласно законам Пойнтинга». Здесь он ссылается на знаменитую теорему Джона Пойнтинга, ученика Максвелла, согласно которой электромагнитное поле может быть представлено в пространстве тремя взаимно ортогональными векторами, представляющими, соответственно, напряженность электрического поля  $E$ , магнитного поля  $B$  и градиент энергии поля  $S$ . Теорема Пойнтинга задает соотношения между этими величинами.

Пуанкаре рассматривает электромагнитное возбуждение, распространяющееся «слева направо» из некоторой точки пространства  $O$ . И продолжает: «Такое возбуждение очень быстро затухнет и останется лишь волна, постепенно удаляющаяся вправо от точки  $O$ . Отсюда следует, что полная энергия, переносимая волной, соответствует вызвавшему возбуждение возмущению».

Дальнейшее у этого выдающегося математика проблем не вызывает: «Определим величину энергии, проходящей через заданную площадь. Согласно теореме Пойнтинга, она равна произведению данной площади на величину радиус-вектора со следующими компонентами»...<sup>2</sup>

Результат вычислений таков. Пусть  $m$  есть «масса» фиктивной жидкости, содержащейся в единице объема. Перемещаясь со скоростью света, эта масса переносит импульс, равный  $mc$ . Согласно теореме Пойнтинга, если  $S$  есть градиент энергии поля, то импульс, содержащийся в единице объема, равен  $S/c^2$ . Отсюда получаем  $S/c^2 = mc$ . Энергия связана с градиентом соотношением  $S = Ec$ . Выражение  $S/c^2 = mc$  тогда можно привести к виду  $E = mc^2$ .

Итак, уже в 1900 г. в распоряжении Пуанкаре была формула, устанавливающая эквивалентность массы и энергии. Конечно, определенная таким образом масса была «фиктивной», но уже через пять лет он снова «откроет» эту эквивалентность, теперь уже в рамках новой релятивистской механики.

### ... Обращается к местному времени Лоренца

Последние двадцать пять страниц статьи Пуанкаре содержат поразительное изложение того, что вскоре его усилиями станет теорией относительности. Я приведу здесь некоторые отрывки, имеющие прямое отношение к тому, чем вскоре займется Альберт Эйнштейн.

Пуанкаре обращается к понятию «местного времени», введенному Лоренцем: «Я предполагаю, что наблюдатели, помещенные в разных точках пространства, синхронизируют свои часы при помощи световых сигналов; что они корректируют время распространения этих сигналов, игнорируя при этом смещение [Земли], в которое они вовлечены, и полагая тем самым, что сигналы передаются в обоих направлениях с одинаковой скоростью; они обмениваются наблюдениями, посылая сначала сигнал из  $A$  в  $B$ , а затем из



В в А. Местное время  $t'$  есть время, показываемое отрегулированными таким образом часами. Если  $V$  есть скорость света, а  $v$  – скорость смещения Земли, направление которой я полагаю параллельным положительной оси  $x$ , то получаем  $t' = t - vx/V^2$  [где  $t$  означает “истинное” время]».

Как же отреагирует на эту статью Лоренц?

### ... И ставит Лоренца в трудное положение

20 января 1902 г. Лоренц пишет Пуанкаре, чтобы поблагодарить за работу в юбилейном сборнике: «Так как Ваше мнение для меня исключительно важно [...], я изучил Ваши доводы с особым вниманием, которого они требуют, и я чувствую всю силу Ваших замечаний».<sup>3</sup> Затем он на восьми страницах старается... опровергнуть предложенный Пуанкаре теоретический подход, чтобы спасти свою теорию электрона. «Должен признаться, что изменить теорию так, чтобы эта трудность исчезла, представляется мне невозможным. [...] Я склонен скорее полагать [...], что нарушение принципа противодействия необходимо во всех теориях, которые могут объяснить опыт Физо».

Он поясняет: «Постоянно помня об аберрации, я всегда полагал, что эфир абсолютно неподвижен, я хочу сказать, что элементы его объема не перемещаются, хотя и могут быть средой некоторых внутренних движений. [...] Если тело никогда не перемещается, нет никаких причин говорить о силах, действующих на него. Поэтому я решил больше никогда не говорить о силах, действующих на эфир».

Он даже утверждает: «Я говорю, что эфир действует на электроны, но я не говорю, что эфир, в свою очередь, также испытывает противодействие». Это приводит его к следующему выводу: «Таким образом, я отрицаю принцип противодействия в этих элементарных актах».

И это еще не все! Лоренц — как видно, с легким сердцем — решается на поразительную авантюру. Вот что он считает нужным добавить: «Развивая эту мысль, я также не могу говорить о силе, с которой одна часть эфира действует на другую. [...] Давление Максвелла не существует в действительности, это математическая фикция, служащая для простого расчета силы, которая действует на весомое тело. [...] Очевидно, тогда я не должен беспокоиться о том, что давление, действующее на небольшой участок поверхности эфира, не будет ничем уравновешено». Это последнее замечание, ясное дело, снимает все проблемы!

Никогда еще поспориение общепринятых представлений не было выражено так кратко и непринужденно, причем заметьте, в письме крупного ученого к коллеге! И с такой силой!

В конце письма Лоренц приносит извинения за то, что его новые идеи далеки от реальности: «[Наверное] я не пришел бы к этой теории, если бы меня не вынудили к тому явления аберрации». Да и отрицательный результат опыта Майкельсона не выходит у него из головы. Четыре раза Лоренц пытался изменить свою теорию так, чтобы она как-то учитывала этот результат, и с четвертой попытки это ему удалось.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup> Poincaré H., *La Lumière et les Théories électrodynamique*, 2 éd., Gauthier-Villars, 1901.  
Курсив Пуанкаре.

<sup>2</sup> Poincaré H., *Leçons professées à la Sorbonne, 1899, reproduites in Optique et Électricité*, J. Gabay, 1890, §351, p. 452.

<sup>3</sup> Письмо Лоренца Пуанкаре, 20 января 1901 г., приведено в A.I. Miller, *Frontiers of Physics*, Birkhäuser, 1986, p. 6.

## Пуанкаре предвидит новый «общий закон природы»

### Момент открытия

В ходе знаменитого доклада, прочитанного в Психологическом обществе в 1908 году, Пуанкаре рассказал, как он пришел к своим фундаментальным открытиям, которые являлись ему «внезапно, быстро и с мгновенной уверенностью», в тот момент, когда он меньше всего этого ожидал. Он приводит тому несколько примеров, и вот один из них:

«Я переехал в Мон-Валерьян, где должен был продолжать военную службу. Таким образом, занятия у меня были весьма разнообразны. Однажды, во время прогулки по бульвару, мне вдруг пришло в голову решение одного трудного вопроса, которое раньше от меня ускользало. Я не стал пытаться вникать в него немедленно и лишь после окончания службы вновь взялся за проблему. У меня были все элементы и мне оставалось только собрать их и привести в порядок. Поэтому я сразу и без всякого труда полностью написал эту работу».<sup>1</sup>

В 1901 году Пуанкаре присутствует в Сорбонне на защите диссертации Виктора Кремо, ученика физика Габриэля Липпмана, будущего лауреата Нобелевской премии по физике за 1908 г. Высказанное Пуанкаре соображение ярко демонстрирует ясность его мысли: «Рассмотрим два электрически заряженных тела. Хотя они кажутся нам находящимися в покое, оба они вовлечены в движение Земли. Но как показал Роуланд,<sup>2</sup> движущийся заряд эквивалентен току; эти два заряженных тела эквивалентны тогда двум текущим параллельно токам, которые должны испытывать взаимное притяжение».<sup>3</sup> Измерив силу такого притяжения, мы измерили бы скорость Земли, но не по отношению к Солнцу или неподвижным звездам, а ее абсолютную скорость».

Но на самом деле такого притяжения нет. Отсюда он делает вывод («внезапно, быстро и с мгновенной уверенностью») о том, что «невозможность экспериментально продемонстрировать абсолютное движение Земли есть общий закон природы». Вернемся ненадолго в прошлое и посмотрим, как относились физики к понятию «абсолютного движения».

### Ньютон формулирует свою систему мира

Под сводами Тринити-колледж Кембриджского университета Исаак Ньютон глубоко озабочен одной проблемой – какие фундаментальные понятия нужно положить в основу разрабатываемой им системы мира? Ради этого он даже на время отложил свои алхимические труды и исследования высказываний библейских пророков.<sup>4</sup>

Его выдающиеся предшественники с континента — Галилео Галилей, Рене Декарт и Христиан Гюйгенс — придерживались взглядов, высказанных Декартом в его *Первоначалах философии*<sup>5</sup> (Ньютон прочел этот труд в латинском оригинале) и кратко изложенных следующим образом: «[Движение], отделяющее друг от друга два соприкасающихся тела, приписывается одному телу преимущественно перед другим». Такого же мнения придерживался и Гюйгенс: «Движение тел с равными или неравными скоростями

должно рассматриваться по отношению к телам, которые считаются покоящимися».<sup>6</sup>

Для Ньютона это было неприемлемо: если движение — любое движение — всего лишь относительно, то оно не более чем иллюзия. Но разве можно допустить, пусть даже на секунду, что Господь, Создатель всего, мог сотворить одно из своих созданий иллюзией?

Отвергнув взгляды ученых с континента, Ньютон сформулировал свои, основанные на представлениях его кембриджских покровителей — философа и теолога-неоплатоника Генри Мора и королевского капеллана, впоследствии президента Тринити-колледжа, Исаака Барроу, которого он позднее сменил на посту лукасианского профессора математики. Ньютон, конечно, признавал реальность относительного движения, которое есть «перемещение из одного относительного положения в другое относительное положение», и признавал даже, что «очень трудно установить истинные движения всех тел и отличить их от их кажущихся движений».<sup>7</sup> Но если даже эта задача и «трудна», она все же в принципе выполнима. Он утверждает: «В дальнейшем мы увидим, как обнаружить истинные движения, вызываемые их причинами, их следствия и их кажущиеся различия»... Опираясь на взгляды своих покровителей, он разрабатывает систему мира, в которой небесные тела движутся в абсолютном пространстве, «не имеющем связи с чем бы то ни было внешним», в непоколебимом «истинном и математическом» времени, которое также является абсолютным. Такая система допускает «абсолютное движение», которое есть «перемещение тела из одного абсолютного положения в другое абсолютное положение».

Колоссальный успех такой системы мира привел к ее безусловному принятию, и основы никто не оспаривал... до поры до времени.

Прежде чем двигаться дальше, отметим, что принцип относительности движения был отвергнут, по сути, по чисто теологическим причинам.

Вернемся к Пуанкаре в тот момент, когда он формулирует свой «общий закон природы». Проанализируем, что же такого замечательного и необычного содержится в этом общем законе: Пуанкаре предлагает признать, что природа «заговорщически» мешает нам измерить каким-либо способом «абсолютную» скорость. Отметим также, что этот общий закон не ограничен рассмотрением только каких-то выделенных типов движения. К этому я еще вернусь.<sup>8</sup>

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Poincaré H., *Bulletin de l'Institut Général Psychologique*, 8 année, no 3, 1908, pp. 175–187.

<sup>2</sup>Здесь Пуанкаре ссылается на опыты, проделанные в 1876 г. в Берлине молодым американским физиком Генри Огастасом Роуландом (1848–1901), показавшие, что движущийся заряд эквивалентен току. Он неоднократно (к моему удовольствию) повторял это соображение, показывая какое значение придавал этому открытию.

<sup>3</sup>Два протекающих параллельно тока притягиваются, если они текут в одном направлении, и отталкиваются, если их направления противоположны. Это было установлено еще Ампером.

<sup>4</sup>См. например, J.-P. Auffray, *Newton ou le Triomphe de l'alchimie*, Le Pommier, 2000.

<sup>5</sup>Descartes R., *Principia philosophiae*, Livre 2, §30.

<sup>6</sup>Huygens C, *Œvres complètes*, vol. XVII, p. 124.

<sup>7</sup>Newton I., *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 3e éd. London 1726.

<sup>8</sup>Выдающийся современный физик Ричард Фейнман, нобелевский лауреат по физике 1965 г., был одним из тех, кто отметил исторический вклад Пуанкаре. В своих знаменитых *Лекциях по физике* он сказал: «Пуанкаре в конечном счете убедился, что этот «заговор» есть закон природы и предложил признать реальность такого закона».

## Знакомьтесь — Альберт Эйнштейн

### Эйнштейн поступает в Федеральное бюро промышленной собственности

В 1902 г. Альберту Эйнштейну 23 года. Он молод, беден, полон замыслов и очень раздосадован. Позже, вспоминая о четырех годах, проведенных по воле отца в готовившем инженеров Цюрихском политехникуме, он описал дружеские отношения с лучшим студентом по специальности VI-A, молодым венгром Марселем Гроссманом (1878–1936): «Я вспоминаю наши студенческие годы. Ты — идеальный студент, и я — безалаберный мечтатель. Ты [...] понимающий всё, и я — пария, неудовлетворенный и непопулярный»... По окончании политехникума в 1900 году Гроссман тут же получил работу. Эйнштейн — нет. «Потом наше учение закончилось. Внезапно весь мир от меня отвернулся и я остался один, не зная, куда идти»... К счастью, друг Марсель его не покинул, и благодаря своему отцу смог устроить Эйнштейна в Бюро промышленной собственности. Такие были времена! «Для меня это стало спасением. Так я избежал если не гибели, то, по крайней мере, душевных страданий».<sup>1</sup>

3 февраля он приезжает в Берн. Город кажется ему великолепным: «По обеим сторонам улиц идут старинные аркады, так что даже в проливной дождь можно пройти город из конца в конец и остаться совершенно сухим!»<sup>2</sup> За скромную сумму в 23 франка в месяц он снимает большую меблированную комнату на втором этаже дома № 3 по Герехтиггайтсгассе и, обосновавшись там, сразу же дает короткое объявление в местной газете: «Частные уроки математики и физики для студентов и школьников даются с большой тщательностью Альбертом Эйнштейном, выпускником Федерального политехнического института».<sup>3</sup>

На следующий день по указанному адресу является молодой человек. Это румынский еврей, студент Бернского университета; как и Эйнштейн он увлекается философией. У него усы, он носит помятый воротничок, костюм-тройку... как и Эйнштейн. У него быстрый и любознательный ум... как у Эйнштейна. Зовут его Морис (Мориц) Соловин. Молодые люди понравились друг другу и подружились. Они останутся друзьями на всю жизнь.

23 июня Эйнштейн начинает работать в качестве эксперта третьего класса в созданном в 1888 г. Федеральном бюро промышленной собственности, которое многие называют просто Патентным бюро. Начинается его профессиональная карьера, которая продлится более семи лет и окажет на него глубокое влияние.

В чем, собственно, состоит его работа? Шесть дней в неделю он пешком отправляется в бюро, которое располагается в пятиэтажном здании на углу Генфергассе и Шпайхергассе. Здесь, сидя на табурете по восемь часов в день, он, в компании двенадцати других экспертов, под доброжелательным, но строгим надзором директора доктора Фридриха Халлера изучает проекты, предложенные авторами, желающими получить патент. «Самые неординарные и умные из изобретателей, — говорит Денис Брайан, биограф Эйнштейна, — писали иногда очень заумно и запутанно. Экспертам это было по нраву. Это напоминало игру, в которой нужно было найти ключ к секретному коду. Эйнштейну нравилось разбираться в сути новшеств, расшифровывать тарабарщину и превращать ее в ясное изложение».<sup>4</sup> Филипп

Франк, другой известный биограф Эйнштейна, добавляет: «Прежде всего требовалось вышлепушить описание основных идей изобретения. Большей частью это было непросто, и давало ему возможность хорошенько разобратся в новых интересных идеях».<sup>5</sup>

Стало привычным иронизировать по поводу того, что Эйнштейн в течение семи лет оставался простым экспертом Патентного бюро в Берне, до того, как его признали одним из величайших физиков всех времен. На самом деле он никогда не был счастливее — и в профессиональном отношении, и в семейной жизни — чем в те бернские годы, когда занимался работой, которая так ему подходила, потому что у него был дар, необходимый для ее творческого исполнения. Он и сам сказал: «Для меня было настоящим благословением заниматься окончательной отделкой патентов».<sup>6</sup> Это он называл *мастерить*.

### Эйнштейн основывает *Академию Олимпия*

Эйнштейн доволен своей новой работой и вскоре основывает вместе со своими новыми друзьями Морисом Соловином и Конрадом Габихтом, которого встретил в Шаффхаузене, маленькую колонию «изгнанников в большом городе» с названием *Академия Олимпия* в насмешку над напыщенными академиками. Эйнштейн получает «официальный» титул рыцаря Альберта фон Штайсбайна (копчика), Президента, а Соловин — Морица фон Инсольвини (неимущего), Секретаря. Инженер-электрик Люсьен Шаван вскоре станет четвертым и последним членом их группы.

«Олимпийцы» встречаются то у одного, то у другого, а нередко и в кафе. Частенько собрания бывают шумными, и это иногда шокирует соседей. Они едят сосиски, сыр, фрукты и запивают все кофе, охотно приготавливаемый Габихтом, мастером этого дела. В воскресенье они прогуливаются, часто забираясь в горы. Во время «заседаний» они читают вслух труды, чаще всего выбранные студентом философского факультета Соловином. . . Пауль Габихт, младший брат «олимпийца» Конрада, тоже иногда участвует в собраниях, но только в качестве приглашенного.

Вскоре после рождения Эйнштейн женится. Молодые супруги переезжают в новую квартиру на втором этаже в № 49 по Крамгассе, самой красивой улице Берна, столь любимой Гёте. Каждую неделю, когда подходила их очередь, они принимали «олимпийцев», устраивали чтения и веселились до полуночи.

*Академия Олимпия* сыграла в жизни Эйнштейна необыкновенно важную роль — сравнить ее можно с периодом Бато-Лавуар в жизни Пикассо,\* да и происходило это все примерно в то же время. Именно там зародились основные идеи, которые будут занимать его всю жизнь.

Но вернемся на несколько лет назад.

1894 г. Альберт Эйнштейн (ему 15 лет) приезжает из Вюртемберга к родителям, недавно поселившимся в Италии. Отец спрашивает его: «Чем ты хочешь заниматься?» Эйнштейн без колебаний отвечает: «Преподавать философию». Отец восстает и семья его поддерживает. «Побеждает Гер-

\* Имеется в виду период с 1904 по 1907 гг., когда в доме на Монмартре, прозванном Бато-Лавуар, собирались ставшие впоследствии знаменитыми художники и поэты (в том числе Пикассо, Матисс, Брак, Утрилло, Аполлинер, Кокто, Гертруда Стайн). В конце этого периода Пикассо пришел к кубизму. — (прим. перев.)

ман Эйнштейн, — говорит Денис Брайан, биограф Эйнштейна. — Он уговаривает сына перенести непереносимое и поступить на курсы инженеров-электриков». <sup>7</sup> Дальнейшее уже давно стало легендой — Эйнштейн поступает в Политехнический институт в Цюрихе, где ему предоставляется другая возможность: стать преподавателем математики и физики. Здесь он встречается свою будущую жену, прогуливает лекции по математике, изучает физику, французский, получает диплом, не находит работы и возмущается мерзавцами-профессорами, которые не берут его в ассистенты. . .

Бюро патентов и *Академия Олимпия* становятся его утешением и убежищем. В окружении друзей и жены Милевы он читает философов — Юма, Канта, Спинозу, Маха, Пуанкаре. . .

Пуанкаре? Вернемся немного назад.

Основатель французского Астрономического общества Камиль Фламмарин опубликовал в одноименном издательстве серию научно-популярных изданий, в том числе *Популярную астрономию*, которая доставила читателям в 1879 году истинное наслаждение. Будучи с 8 ноября 1900 г. членом совета Парижской обсерватории, и став в 1901 г. президентом Астрономического общества Франции, именно Пуанкаре мог славно продолжить эту традицию, и такая возможность ему вскоре представилась.

В 1902 г. Гюстав Лебон был уже немолод, ему перевалило за шестьдесят. Он был весьма экстравагантной личностью — обучался медицине, а потом занялся наукой и создал «социальную психологию» (которой, как говорят, увлекался Адольф Гитлер, чтобы научиться повелевать массами). Эрнест Фламмарин уговорил его стать главным редактором нового издания — *Библиотеки научной философии*, выходившей в его издательстве. В порядке эксперимента Лебон предложил Пуанкаре свести в один сборник статьи по философии науки, которые тот опубликовал в различных философских журналах — парижском *La Revue de Métaphysique et de morale*, чикагском журнале *The Monist* и в лондонском *The Philosophical Magazine*. Пуанкаре принял это предложение.

В этих статьях из-под его пера часто вылетает одно характерное слово. Похоже, что впервые оно появилось на страницах журнала *The Monist* в статье «On the Foundations of Geometry» (Об основаниях геометрии), опубликованной в октябре 1898 г.: «Рассмотрим любую материальную систему [. . .]. Состояние тел и расстояния между ними в любой момент [. . .] никоим образом не зависят ни от абсолютного начального положения системы, ни от ее абсолютной исходной ориентации. Это то, что в интересах краткости, я буду называть *законом относительности* [курсив Пуанкаре]».

*О-т-н-о-с-и-т-е-л-ь-н-о-с-т-и*. . . Это слово уже произнесено.

## Эйнштейн читает Пуанкаре

В один прекрасный день *Академия Олимпия* в Берне пробуждается со страшным шумом — из Парижа прибыла потрясающая книга. Называется она «Наука и гипотеза», ее автор француз, о котором олимпийцы не знают почти ничего — Анри Пуанкаре. Олимпийцы набрасываются на нее. Глава VI, часть «Сила» их поражает:

1. Абсолютного пространства не существует [. . .];
2. Не существует абсолютного времени [. . .];



3. Мы не способны непосредственно воспринимать [...] одновременность двух событий, происходящих в различных местах [...];
4. Наконец, наша евклидова геометрия есть лишь род условного языка [...].»

Отсюда автор делает следующий вывод: «Таким образом, абсолютное пространство, абсолютное время, даже сама геометрия не имеют характера вещей, обуславливающих собой механику [...]. Можно было бы попытаться изложить основные законы механики на языке, независимом от всех этих соглашений».<sup>8</sup>

Хотя *Наука и гипотеза* производит на олимпийцев сильнейшее впечатление и держит их в напряжении многие недели,<sup>9</sup> они не до конца понимают рассуждения Пуанкаре — они плохо знакомы с применяемыми им математическими приемами. В частности, они ничего (или почти ничего) не знают о *теории групп*, которая была тогда новинкой, малоизвестной даже в университетских кругах.

## Бессо присоединяется к Эйнштейну в Берне

Пуанкаре всегда работал в одиночку. Темп его работы просто исключал участие каких-либо сотрудников. Эйнштейн же постоянно испытывал потребность в помощниках, в сотрудниках, или просто в друге, который помогал бы ему в работе. «В течение жизни, — отмечает его выдающийся биограф Абрахам Пайс, — у него было удивительно большое число сотрудников — больше тридцати».<sup>10</sup>

В 1904 г. в жизни Эйнштейна произошло несколько важных событий. Во время учебы в Цюрихском политехникуме он познакомился с молодым инженером, как и он страстно увлеченным физикой... и музыкой. Мишель Бессо, старший сын из испанской еврейской семьи, обосновавшейся в Триесте, получил диплом инженера-электромеханика с великолепными оценками — шесть из шести по математике и физике, по нескольким предметам пять с половиной и ни одной оценки ниже средней. Молодые люди стали друзьями на всю жизнь.

В январе сияющий Мишель Бессо, который три долгих года проработал в Триесте, появляется в Берне. Эйнштейн уговорил директора Бюро патентов нанять его в качестве эксперта. Теперь они будут работать вместе. Главными чертами Бессо были неугасимая жажда знаний и величайшая наивность. Вскоре он станет незаменимым компаньоном Эйнштейна, молчаливым свидетелем и соучастником всех его даже самых безрассудных предприятий.

Бессо появляется в Берне в самый подходящий момент. Дело в том, что в феврале *Академия Олимпия* распадается! Конрад Габихт, один из отцов-основателей, переезжает в маленький городок Ширс в кантоне Гризон, где ему предстоит преподавать математику и физику в частной школе. 2 марта Морис Соловин, секретарь академии тоже покидает Берн — он едет в Страсбург, где надеется продолжить изучение философии.

14 мая в жизни Эйнштейна происходит еще одно важное событие — у него рождается сын, Ганс Альберт. А 20 сентября, наконец, приходит еще одна хорошая новость — его шеф, доктор Халлер, сообщает, что он

утвержден на постоянную должность технического эксперта Бюро патентов с прибавкой к жалованию.

И это еще не все! В том же году Эйнштейн договаривается с издателями *Annalen der Physik*, самого престижного издания в Германии, а в то время может быть и во всем мире, о том, что будет регулярно поставлять им обзоры статей, появившихся в других журналах или научных публикациях.

Ни один биограф Эйнштейна не упоминает об этом, а между тем это один из знаменательных фактов его профессиональной жизни — издатель *Annalen* поручает ему обзоры статей по термодинамике, любимой теме их главного редактора, Макса Планка... и это знак большого уважения и доверия!<sup>11</sup>

Эйнштейн берется за дело с большим рвением — только в 1905 г. он составил двадцать один обзор, которые напечатаны в приложении *Beiblätter zu den Annalen der Physik* иногда по пять–шесть за выпуск. Для обзоров он выбирает статьи из десяти разных научных журналов, публикуемых в Германии, Великобритании, Италии и Франции, в частности, *Comptes rendues* (Отчеты о заседаниях) Парижской Академии наук.

В Берне Мишель Бессо каждый день сопровождает Эйнштейна домой, иногда он заходит за ним утром, чтобы вместе отправиться в Бюро; они встречаются по вечерам и по выходным, разговаривают обо всем на свете. Бессо интересуется всем: гражданским правом, английской литературой, небесной механикой, физикой... и читает запоем.<sup>12</sup> «Из месяца в месяц, из года в год он накапливал знания в поразительном темпе»,<sup>13</sup> — пишет его биограф Пьер Специали. Но Бессо бросается от одного к другому, он беспорядочен и лишен целеустремленности, он охотно разбазаривает свой талант. Эйнштейн сравнивал его с бабочкой: «Я по-прежнему верю, что ты мог бы сделать много интересного в науке будь ты однолюбом. Бабочка — не крот, но сожалеть ей об этом не стоит».<sup>14</sup>

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Письмо, направленное Эйнштейном 26 сентября 1936 г. вдове Марселя Гроссмана после смерти ее мужа в Цюрихе 7 сентября 1936 г.; цитируется по Brian, *Einstein*, op. cit., p. 340.

<sup>2</sup>Письмо Эйнштейна Милеве Марич, *Lettres d'amour et de science*, no. 49, Le Seuil, 1993.

<sup>3</sup> *The Collected papers*, vol. I, doc. 135, Princeton University Press, 1987–1998.

<sup>4</sup>Brian D., *Einstein, a Life*, New York, John Wiley & Sons, 1996.

<sup>5</sup>Frank P., *Einstein, sa vie, son temps*, Flammarion, coll. "Champs", 1991, p. 59.

<sup>6</sup>Цитируется по Françoise Balibar, *Einstein, la joie de la pensée*, Gallimard, coll. "Découvertes", 1993, p. 24.

<sup>7</sup>Brian D., op. cit., p. 22.

<sup>8</sup>Poincaré H., *La Science et l'Hypothèse*, Flammarion, 1902. Пуанкаре А., *Наука и гипотеза*, в Анри Пуанкаре, *О науке*, М. Наука, 1983, с. 64.

<sup>9</sup>Einstein A., *Lettres à Maurice Solovine*, Paris, Gauthier-Villars, 1956, p. viii. Вот что говорит по этому поводу биограф Эйнштейна Абрахам Пайс: «Хочу подчеркнуть, что Эйнштейн с друзьями не просто листали работы Пуанкаре. Соловин оставил нам подробный список книг, изучавшихся членами Академии. Из всего списка он выделяет одну-единственную книгу — «Наука и гипотеза». Pais A., *Subtle is the Lord...*, Oxford, Oxford University Press, 1982, p. 133. Русский перевод: Пайс А. *Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*, М. Наука, 1989, с. 132.

<sup>10</sup>Pais A., *Subtle is the Lord...*, op. cit., p. 483.

<sup>11</sup>Это весьма примечательно, поскольку биографы Эйнштейна говорят, что он мало читал и не был в курсе того, что происходило в интересовавших его областях.

<sup>12</sup>После его кончины 15 марта 1955 г. (через пять недель, 18 апреля, скончался и Эйнштейн) в бумагах Бессо нашли сотни библиотечных формуляров с названиями заказывавшихся им книг. [В оригинале автор ошибочно указывает 1954 г. как год кончины Бессо и неверно сообщает, будто бы Эйнштейн скончался через три недели после Бессо. Мы исправили эти ошибки. — *перев.*]

<sup>13</sup>Speziali P., op. cit., introduction, p. xxv. Чтобы лучше представить себе познания эклектичного сверходаренного Мишеля Бессо, достаточно познакомиться с его университетскими достижениями. В 1890 г. в возрасте 17 лет он получает в Римском университете 30 из 30 по алгебре, и 28 из 30 по аналитической геометрии. Через год он слушает курсы Фробениуса, Гурвица, Фидлера и Гайзера в Цюрихском политехникуме, дважды получив у Гурвица 6 из 6 на выпускных экзаменах, не говоря уж о двух шестерках по физике, полученных у Вебера. Успехи Эйнштейна были далеко не столь выдающимися.

<sup>14</sup>*Ibid.*, письмо Эйнштейна Бессо, no. 153. Не хотел ли он стать новым Пик де ля Мирандолом? [Jean Pic de La Mirandole (Giovanni Pico della Mirandola), 1463–1494, итальянский гуманист и философ, о котором Лаплас, якобы, сказал, что тот знал, все что только можно было знать. Символ блестящей, но поверхностной эрудиции. — *перев.*] «Не стремился ли он исполнить мечту, которую воплотили в жизнь гуманисты Возрождения – овладеть всеми знаниями своего времени?» Ничто не мешает нам так думать. См. Speziali P., *Albert Einstein, correspondance avec Michele Besso*, op. cit., p. xxv.

# Относительность. Начало большого пути

Почему все утверждают, что часы круглые?  
Ведь очевидно, что это неправда, потому как в профиль  
они узкий прямоугольник, на три четверти эллиптический.  
И почему, проклятые, на их форму обращают внимание,  
только когда хотят узнать время?  
Возможно, под предлогом извлечения пользы.

Альфред Жарри  
Элементы 'патафизики,\* 1898 г.

## Кауфман и Абрагам расчищают путь

### Молодая геттингенская гвардия

В последней главе *Науки и гипотезы*, озаглавленной «Конец материи», Пуанкаре обращает внимание на следующее — движущийся электрон есть электрический ток, и, однажды появившись, ток стремится сохраниться, точно так же, как любое движущееся тело стремится сохранить свою скорость. Движущийся электрон сопротивляется всему, что может изменить его скорость, прежде всего из-за своей инерции, затем потому, что всякое изменение скорости тут же изменит величину тока. Итак, у электрона есть две инерции — две массы: одна исключительно механического происхождения (которая у него будет даже при отсутствии заряда), другая электродинамического происхождения, обусловленная зарядом. Именно эта идея вдохновила Вина на *Umwälzung*. Пуанкаре замечает: «[В Геттингене] Абрагам и Кауфман, один — теоретик, другой — экспериментатор, объединили свои усилия для того, чтобы определить, какую долю составляет каждая из них».<sup>1</sup>

Основной результат — кажущаяся масса электрона<sup>2</sup> увеличивается вместе со скоростью — представленный Вальтером Кауфманом на семьдесят

\* 'Патафизика' (*'Pataphysique*) придумана французским писателем Альфредом Жарри (Alfred Jarry, 1873–1907). Он определял ее как «науку вымышленных решений, символически придающую образам свойства объектов, описываемых через их скрытые признаки». Жарри считается одним из вдохновителей сюрреалистов. Он настаивал на написании названия его науки с апострофом в начале, дабы «избежать каламбуров». С 1948 г. во Франции существует коллеж патафизики, издающий труды в этой области и выдающий дипломы. — (прим. перев.)

четвертом заседании *Naturforscherversammlung* (Общества естествоиспытателей) в Карлсбаде в сентябре 1902 г., произвел эффект разорвавшейся бомбы.<sup>3</sup> Макс Абрагам, который делал следующее сообщение<sup>4</sup>, предложил теоретическое объяснение этого явления. Его выкладки, столь же сенсационные, показывают, что механическая масса электрона равна... нулю! Он провозглашает: «Отныне становится необходимым с самого начала строить динамику электрона на основе электромагнетизма».<sup>5</sup>

Выкладки Абрагама послужили основой создания теории относительности. Стоит поэтому подробнее рассмотреть их, чтобы лучше понять к чему они привели.

### Поле, рассматриваемое как «фиктивная жидкость»

Электрон, изолированный где-то в пространстве, создает поле, заполняющее все это пространство. В свою очередь, поле воздействует на электрон силой Лоренца. Электрон ощущает воздействие силы, а поле — нет.

В том виде, как она была сформулирована Лоренцем, теория нарушала принцип равенства действия и противодействия.

Чтобы навести порядок, Абрагам решает буквально следовать Пуанкаре и рассматривать поле как фиктивную жидкость, то есть систему, способную содержать энергию и поддерживать движение, и которую можно было бы изучать методами аналитической механики Лагранжа. Он выбрал этот метод потому, что и по сей день механика Лагранжа остается непревзойденным способом решения такого рода задач. Посмотрим, что в же в ней такого особенного.

Если считать, что электрон имеет массу  $m$  и испытывает воздействие силы  $F$ , то это механика «типа ньютоновой»: сила сообщает электрону ускорение по формуле  $F = ma$ . Если считать, что электрон переносит импульс — это механика «типа декартовой». Если считать, что электрон обладает потенциальной энергией  $U$  и кинетической энергией  $T$ , то это механика «типа лагранжевой». При малых скоростях кинетическая энергия равна  $(1/2)mv^2$ , так что механика Лагранжа практически эквивалентна механике Ньютона и Декарта. Однако, эквивалентна не вполне.

В механике Лагранжа, для механической системы с кинетической энергией  $T$  и потенциальной энергией  $U$  сумма  $T + U$  есть полная энергия системы и ничего сенсационного в этом нет. Рассмотрим, однако, *разницу*  $T - U$ , а она чему-то соответствует?

Лагранж без сомнений отвечал утвердительно, и показал, как построить механику, в которой эта разница играет фундаментальную роль. Физики называют сумму  $T + U$  *гамильтонианом* системы,<sup>6</sup> а разницу  $T - U$  — *лагранжианом*.

Абрагам начинает строить лагранжиан своей фиктивной жидкости.<sup>7</sup> Для начала требуется найти значение для потенциальной энергии  $U$  и кинетической энергии  $T$  поля. Исходя из представлений Максвелла о поле, он полагает  $U$  пропорциональной квадрату напряженности электрической составляющей  $E$ , а  $T$  — пропорциональной квадрату напряженности магнитной составляющей  $B$ , так что лагранжиан пропорционален  $E^2 - B^2$ . Построение этого лагранжиана — крупнейший вклад Абрагама в физику.

Электрон ощущает действие создаваемого им поля в данный момент времени в данной точке, а поле заполняет все пространство. Следуя Пу-

анкаре, Абрагам на втором этапе выбирает в качестве своего лагранжиана полное значение  $E^2 - B^2$ , взятое по всему пространству. Этот лагранжиан есть полная величина поля, созданного электроном! Абрагам тут же делает первое (но отнюдь не последнее!) открытие — электрон есть одновременно и частица... и поле. На третьем этапе Абрагам принимается за расчет величины импульса поля. Для этого требуется уточнить модель электрона.

Модель Абрагама не позволяла добиться полного успеха — она была слишком проста.<sup>8</sup> Но она позволяла встать на правильный путь, что уже немало!

## Электрон Абрагама

Электрон создает поле, описываемое двумя составляющими: напряженностями электрической составляющей **E** и магнитной составляющей **B** (будем называть это системой **E, B**). Рассмотрим теперь альтернативное представление этого поля.

Будем полагать, что электрон создает *сферический потенциал*  $\varphi$ , а производимый им при движении ток создает *векторный потенциал* **A** (назовем это системой  $\varphi, \mathbf{A}$ ).<sup>9</sup> Придуманное Дени Пуассоном представление поля в виде потенциалов, имеет массу преимуществ, в частности, потенциал тогда удовлетворяет очень простому уравнению, носящему имя Пуассона. В обозначениях, которые мы уже использовали для волнового уравнения (см. прим. 8 на с. 7), оно записывается в виде  $\nabla^2 \varphi = 4\pi\rho$  (где  $\rho$  есть плотность заряда электрона).<sup>10</sup> Как бы то ни было, здесь нас интересует лишь направление перемещения электрона, а следовательно, лишь величина **A** в этом направлении, которую будем обозначать  $A_x$ .

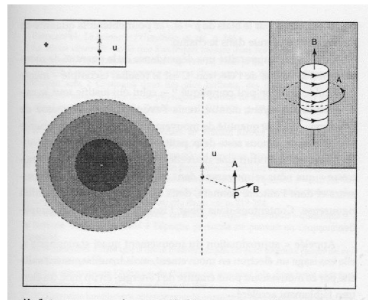
Как мы уже видели, для изучения электрона Лоренц ввел три системы координат. Абрагам ввел лишь две: систему  $x, t$ , которую он жестко привязывает к эфиру, и систему  $x', t'$ , привязанную к электрону.

Записывая уравнения для  $\varphi$  и  $A_x$  в системе, привязанной к электрону, он замечает, что в обоих случаях в членах, соответствующих направлению  $x$ , появляется множитель  $1 - v^2/c^2$ . Тогда он домножает пространственную координату на  $k = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$  — неприятность исчезает. Пока ничего необыкновенного не происходит — это лишь «трюк» сокращения длины Фицджеральда.

Тут Абрагам делает новый шаг — он решает, что заряд электрона должен иметь одну и ту же величину в обеих системах координат. Для этого требуется, чтобы интеграл  $\rho'$  по всему пространству был равен интегралу  $\rho$ , также взятому по всему пространству, что дает  $\rho' = \rho/k$  и  $\varphi' = \varphi/k$ .

Установив это, Абрагам преспокойно решает уравнение Пуассона для системы, в которой электрон неподвижен, откуда получает  $\varphi'$ . Затем он преобразовывает результат, полученный для  $\varphi'$ , в выражение для  $\varphi$  с помощью уравнения  $\varphi = k\varphi'$ , и обнаруживает, что  $\varphi$  пропорционально логарифму  $(1 + v)/(1 - v)$ . Он использует этот результат, чтобы получить  $A_x$  из выражения  $A_x = v\varphi$ , потом переходит от системы  $\varphi, \mathbf{A}$  к системе **E, B**, получая таким образом составляющие электромагнитного поля **E** и **B**, что и дает столь желанный лагранжиан  $L = E^2 - B^2$ . При помощи уравнения  $p = \partial L / \partial v$  он, наконец, получает импульс поля.

В итоге оказывается, что импульс зависит от скорости электрона. К этому результату он и стремился, хотя путь к нему и кажется несколько услож-



Покоящийся электрон создает сферический потенциал; движущийся электрон вызывает электрический ток, а также создает векторный потенциал. При движении электрона векторный потенциал принимает различные формы: например, при круговом движении электрона вокруг соленоида векторный потенциал также будет «окружать» соленоид. Взятые вместе сферический и векторный потенциалы образуют четырехмерный физический объект. Именно исходя из этого, и чтобы с пользой применить математику, Пуанкаре и открывает пространство-время. N.B. Стрелками здесь указано перемещение положительного заряда, а не электрона.

ненным,<sup>11</sup> так как он подтверждает установленное Кауфманом возрастание массы, а, значит, и импульса электрона со скоростью. Теперь остается преодолеть еще два небольших этапа.

Абрагам вводит новое приближение — «соль» новаторского подхода, которому будут потом следовать все другие, и которому Пуанкаре даст два с половиной года спустя строгое определение. Пока же удовлетворимся упрощенным вариантом.<sup>12</sup>

В «приближении квазистационарного движения» (такое оно получило название) электрон считается движущимся так, что он почти не излучает, иными словами, движущимся без ускорения.

Абрагам получает различные результаты в зависимости от того, рассматривается ли направление, совпадающее с направлением движения электрона, или перпендикулярное ему. Похоже, что у электрона две массы электродинамического происхождения. Абрагам называет одну из них продольной (обозначаемой  $m_{\parallel}$ ), а другую — поперечной ( $m_{\perp}$ ).

Он обнаруживает, что при очень малых скоростях величины этих масс совпадают, а при больших скоростях  $m_{\parallel}$  изменяется в зависимости от скорости по формуле  $1 + 6v^2/5 + \dots$ , а  $m_{\perp}$  по формуле  $1 + 2v^2/5 + \dots$

Абрагам получил два основных результата: он не только смог рассчитать для электрона величину электромагнитной массы (хотя, как мы увидим далее, его результаты оставляют желать лучшего), но и ввел несколько новых понятий, послуживших основой для последующих электродинамических выкладок, правда, лишь до той поры, пока в 1904 г. в дело решительно не вмешался Анри Пуанкаре.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Poincaré H., *La Science et l'Hypothèse*, op. cit, p. 246. Пуанкаре А., *Наука и гипотеза*, в Анри Пуанкаре, О науке, М. Наука, 1983, с. 150.

<sup>2</sup>Наблюдаемая масса, то есть та, которую Кауфман измерял в своих экспериментах.

<sup>3</sup>В 1902 г. в возрасте, соответственно, 30 и 27 лет, Вальтер Кауфман и Макс Абрагам были самыми блестящими, самыми талантливыми учеными-физиками в институте, где в разное время работали Гаусс, Вебер и Риман!

<sup>4</sup>Kaufmann W., *Physicalische Zeitschrift*, vol. IV, 1902, p. 54.

<sup>5</sup>Abraham M., *Physicalische Zeitschrift*, vol. IV, 1902, p. 57 и *Annalen der Physik*, vol. X, 1903, p. 105.

<sup>6</sup>По имени ирландского математика сэра Уильяма Роуэна Гамильтона (1805–1865), часто использовавшего этот метод.

<sup>7</sup>Лагранжиан – один из современных методов исследований в физике. Он, в частности, позволяет рассчитать переносимый системой импульс  $p$  из уравнения  $p = \partial L / \partial v$ . См., например, Poincaré H., “De l'explication mécanique des phénomènes physiques”, *La Science et l'Hypothèse*, op. cit. p. 219–224. Пуанкаре А., раздел «О механическом истолковании физических явлений», *Наука и гипотеза*, в Анри Пуанкаре, *О науке*, с. 134–138.

<sup>8</sup>Квантовая механика добавила к формуле Абрагама еще один член чисто квантового происхождения. В то время никто не мог этого заподозрить.

<sup>9</sup>Без особых трудностей, хотя для этого потребуется владение математикой, всегда можно перейти от системы **Е**, **В** к системе  $\varphi$ , **А** и наоборот.

<sup>10</sup>Мы снова встретимся с уравнением Пуассона чуть ниже, и увидим, что оно создало массу проблем для Эйнштейна.

<sup>11</sup>Усложненность выражения для импульса могла бы насторожить Абрагама и намекнуть, что, возможно, его теория несовершенна, если исходить из того, что природа устроена одновременно и сложнее и проще, чем иногда кажется.

<sup>12</sup>Упрощенный вариант позволил Абрагаму определить массу электрона из соотношения  $m = dp/dv$ .



## Пуанкаре формулирует принцип относительности

### Электрон «реальный» и электрон «фиктивный»

В опубликованной в 1899 г. статье Лоренц дал понять, что попытается улучшить свою теорию электрона. В 1904 г. результаты этих усилий увидели свет в *Comptes rendues* (Отчетах) Королевской академии наук Амстердама. До сих пор Лоренц ограничивался рассмотрением оптических явлений, то есть связанных только со светом. Отныне он пытается распространить свою теорию и на *электрические заряды и токи*. Лоренц поясняет, почему он за это взялся: «[Учитывая выдвинутые Пуанкаре возражения], представляется желательным показать, исходя из определенных фундаментальных гипотез и не пренебрегая членами порядка величины [абберрации] или иными, что многочисленные электромагнитные явления не зависят от состояния движения системы».<sup>1</sup>

Он возвращается к своей теории с новой точки зрения. Он говорит себе: моя теория замены переменных дает электрону два разных лица — одно «реальное», а другое «фиктивное». Но поскольку эти два лица принадлежат одной и той же физической реальности, между ними должно существовать соотношение *эквивалентности*.

Остановимся на секунду на этих терминах. Лоренца упрекали в том, что он говорил об электроне *реальном* и электроне *фиктивном* (позднее он называл его *идеальным*), забывая, что он напрямую не имел дела с реальностью — он создавал *теорию*, то есть модель реальности.

Вот у нас фотография штангиста в раздевалке, а вот его же фотография на помосте. Положенные рядом, они показывают два различных лица одного и того же атлета: на одной он *расслаблен*, а на другой его лицо *искажено усилием*. На каждой точке  $P$  искаженного лица должна соответствовать точка  $P'$  лица расслабленного. Теперь посмотрим, как сделать нечто подобное в электродинамике.

Пусть  $P$  есть точка «реального» электрона, а  $x$  есть его координата в момент времени  $t$ . Пусть  $P'$  есть соответствующая точка «фиктивного» электрона, а  $x'$  его координата в момент времени  $t'$ . Задача состоит в том, чтобы установить соотношение эквивалентности для величин  $x'$ ,  $t'$  и  $x$ ,  $t$ . Лоренц уже проделал это в 1895 г., но теперь ему требуется учесть также *заряд* электрона и *электрический ток*, возникающий при его движении.

Для установления своего «соотношения эквивалентности» Лоренц снова использует подход 1892 года, усовершенствованный в 1895 г. (и описанный на с. 34). Он приходит к такому окончательному результату:  $x' = k(x - vt)$ ,  $t' = k(t - vx/c^2)$ , где  $k = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ .

Когда учебники физики, как правило, говорят, что этих уравнений достаточно, чтобы разрешить рассматриваемую нами проблему — не верьте. До сих пор Лоренц лишь продемонстрировал как связать точку реального электрона (с координатами, считающимися абсолютными) — электрона, увлекаемого движением Земли — с соответствующей точкой электрона фиктивного (с координатами, считающимися фиктивными). Он пока еще не показал, как преобразовывать заряд электрона и создаваемое им в пространстве электромагнитное поле.

Лоренц приступает к решению этой задачи. Без какого-либо обоснования он полагает  $\rho' = \rho/k$  и  $u'\rho' = k u\rho$ , где  $\rho$  есть заряд электрона, а  $u$  его скорость в направлении поступательного движения. Его выбор ошибочен, но Лоренц этого не замечает. Он продолжает вычислять, нагромождая одна на другую десяток гипотез — он, кто отвечая на возражения Пуанкаре, заявлял о желании избежать введения дополнительных гипотез! — и при этом делает ошибки (которые Пуанкаре обнаружит и спустя несколько месяцев исправит, разом все изменив). В конце концов, Лоренц получает для продольной и поперечной масс формулы, хотя и немного отличные от предложенных Абрагамом, но все же показывающие, что «кажушаяся» масса электрона растет со скоростью. Так, постепенно, выкристаллизовывается возможность существования электромагнитной природы массы электрона.

### «Пляж Сорбонны»

В начале XX века профессор Сорбонны историк Шарль Сеньёбо (1854–1942) открыл для себя продуваемую всеми морскими ветрами бретонскую деревеньку Аркуэст, расположенную неподалеку от местечка Пэмполь. Он купил там красивый дом из гранита, где любил с неизменной улыбкой и в вечной выгоревшей шляпе принимать гостей и устраивать пешие прогулки и морские вылазки на своей яхте «Эглантин», в особенности для членов маленького кружка, собиравшегося вокруг математика Эмиля Бореля (1871–1956). Его жена — дочь математика Поля Аппеля, друга Пуанкаре, вела тогда дневник, опубликованный позднее под псевдонимом Камиллы Марбо. В этот кружок входили и физики, которым суждено было стать знаменитыми — Жан Перрен, Пьер и Мари Кюри, Поль Ланжевен. . .

Предвосхищая Сен-Тропе, Аркуэст стал чем-то вроде пляжа Сорбонны.

Спаянная общим отношением к делу Дрейфуса,\* которое в те бурные годы раскалывало Францию, эта слегка богемная группка, объединенная товариществом и дружбой и быстро двигавшаяся влево в политическом спектре, вдохновлялась идеями сначала Жана Жореса, а потом и Леона Блюма, которые с жаром защищал один из членов группы, убежденный социалист, библиотекарь Высшей нормальной школы Люсьен Эрр.†

В 1904 г. члены «академии Аркуэст», как и члены бернской «академии», были бедны. Пьер Кюри мечтал, до поры безнадежно, о кафедре в Сорбонне; Поль Ланжевен — о месте в Школе физики и химии в Париже, тогда как его супруга, неудовлетворенная его тогдашним жалованьем (он был всего лишь младшим преподавателем в Коллеж де Франс), шпыняла его и требовала оставить преподавание и перейти на хорошо оплачиваемую работу в промышленности.

\* В 1894 г. капитан французского генерального штаба Альфред Дрейфус (Alfred Dreyfus, 1859–1935), еврей по происхождению, был обвинен в государственной измене и приговорен к пожизненной ссылке. Многие полагали дело сфабрикованным и отдающим антисемитизмом. Франция раскололась на два лагеря — сторонников и противников Дрейфуса, что привело к смене нескольких правительств. В 1906 г. Дрейфус был признан полностью невиновным, восстановлен в армии и награжден орденом Почетного Легиона. — (прим. перев.)

† Жан Жорес (Jean Jaurès, 1859–1914), вожь французских социалистов. Боролся за реабилитацию Дрейфуса, пацифист. Убит французским националистом 31 июля 1914 г. Леон Блюм (Léon Blum, 1872–1950), социалист, первый еврей во главе правительства, премьер-министр в 1936–1937 гг., один месяц в 1938 г. и в 1946–1947 гг. (глава Временного правительства, и.о. президента Франции). Люсьен Эрр (Lucien Herr, 1864–1926), известный в свое время интеллигент, ярый пропагандист социализма. — (прим. перев.)

В 1897 г. Ланжевена направили в командировку в Кавендишскую лабораторию в Кембридж. Директор этой лаборатории сэр Джозеф Джон Томсон незадолго до того объявил: «Если катодные лучи есть движущиеся с большой скоростью заряженные частицы, размер этих частиц должен быть мал по сравнению с обычными атомами или молекулами»,<sup>2</sup> что принято считать экспериментальным открытием электрона. Ланжевен тут же стал ярым его сторонником. Но кроме того, он обнаружил в Кавендише, мягко говоря, странноватую интеллектуальную атмосферу — в мышлении основных действующих лиц преобладал «спиритический» подход. Преподаватель теоретической физики профессор Джозеф Лармор и сам директор лаборатории сэр Джозеф были поклонниками подхода, которому в особенности следовали в Обществе физических исследований. Согласно ему, вещество состояло из «упорядоченного эфира».

По возвращении во Францию, Ланжевен защитил в Сорбонне диссертацию, в которой просматривалась основная идея, быстро овладевшая им полностью — электрон есть связующее звено между веществом и эфиром. Более того, он намеревался искать определения вещества в зависимости от «всепроницающего субстрата», коим является эфир. Движимый этим убеждением, Ланжевен решительно продвигал идеи кембриджской школы, которая открыто заявляла о своем намерении «обэфирить» физику.

В этой не совсем обычной атмосфере Ланжевен публикует одну за другой серию статей, которые, как он надеется, привлекут к себе внимание тех, кто берет на работу в завидные места, например, в Сорбонну. Разве ректор Парижской академии не Поль Аппель, отец «Камиллы Марбо»? К тому же всем известно, что Аппель — преданнейший друг Анри Пуанкаре.

Кто бы ни упоминал в начале XX века имя Анри Пуанкаре, неизменно тут же вспоминал его кузена, будущего президента Французской республики Раймона, видного политического деятеля, но отнюдь не левого толка. Не желая ни с кем портить отношений, ректор посылает Пуанкаре и Ланжевена представлять Францию на международном конгрессе ученых, проходящем одновременно со Всемирной выставкой в Сен-Луисе, штат Миссури. На заседании 22 сентября 1904 г. Ланжевен зачитывает свой доклад, озаглавленный «Физика электронов».<sup>3</sup>

В самом начале выступления он излагает свое кредо: «Понятие электрона [...] всего за несколько лет подверглось значительному пересмотру, который разрушил оковы старой физики и перевернул устоявшиеся понятия законов». Затем он задает столь дорогой его сердцу вопрос: «В какой степени известные свойства вещества и эфира могут быть выведены из понятия электрона и эфира, и что мы можем постулировать помимо этих двух понятий, чтобы построить [новую] систему?»

Отвечая на этот вопрос, Ланжевен сознательно отстаивает решение, предлагаемое сторонниками *Umwälzung*: нужно разрушить существующий порядок, отказаться от освященной веками традиции «мыслить в категориях вещества» и научиться «мыслить в категориях эфира». «Вряд ли разумно пытаться создавать простую и единую среду, каковой является эфир, на основе столь сложного и неоднозначного понятия, как вещество. Я полагаю, что нужно привыкать мыслить «эфирно», вне зависимости от всякого материального представления».

Через два дня, 24 сентября 1904 г. (это историческая дата!) его сменяет на трибуне Пуанкаре.<sup>4</sup> Его доклад был озаглавлен «Современное состо-

яние и будущее математической физики». Вот как описал это выступление астрофизик Лоран Нотталь: «Это был великолепный доклад. Пуанкаре замечательно объяснил в чем суть физических законов, обрисовал основные проблемы и проанализировал суть современного кризиса, напомнил о непреходящих фундаментальных принципах, показал, какие понятия со временем исчезнут или эволюционируют, и предложил решения, демонстрирующие потрясающую прозорливость, поскольку эти решения по сути легли в основу физики XX века».<sup>5</sup>

Я позволю себе остановиться лишь на небольшой части этого исторического доклада, которая касается обсуждаемой нами темы.

## И снова за дело берется Пуанкаре

Пуанкаре начинает свой доклад на высокой ноте: «Не стоим ли мы накануне второго кризиса [математической физики]? Означает ли это, что фундамент, на котором мы строили, рушится»? Далее он уточняет: «Такой вопрос стоит уже некоторое время. Под угрозой не только закон сохранения энергии; в опасности, как мы вскоре увидим, и все другие законы».

Затем он переходит к волновавшей его в то время проблеме — принципу относительности. Это его дитя, предмет его забот и внимания. «Перейдем к принципу относительности, который не только подтверждается повседневным опытом, но и безапелляционно диктуется здравым смыслом. Однако, и этот принцип под угрозой». Наконец, он излагает формулировку этого принципа: «Законы физических явлений должны быть одинаковы как для неподвижного наблюдателя, так и для наблюдателя, находящегося в равномерном поступательном движении, так что мы не имеем и не будем иметь никакой возможности установить, участвуем мы в таком движении или нет».

Обосновывая «абсолютную» уверенность в справедливости принципа относительности, он ссылается на свои рассуждения, высказанные при защите диссертации Виктора Кремё в 1901 г., когда он впервые ступил на путь великого открытия. Затем, возвращаясь к проблеме аберрации, Пуанкаре делится своими выношенными убеждениями: «Я уже упоминал Майкельсона, который продемонстрировал, что физические методы не в состоянии зафиксировать абсолютное движение. Более того, я уверен, что никакие астрономические методы не позволят сделать этого, как бы мы ни повышали точность наблюдений».

В заключение доклада он дает понять, что готов сделать решающий шаг: «Возможно, нужно будет построить новую механику, контуры которой мы пока едва различаем, но в которой инерция возрастает с ускорением, а скорость света становится непреодолимым пределом...».

Итак, мы на пороге создания теории относительности.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Lorentz H.A., *Proceedings of the Royal Academy of Sciences of Amsterdam*, vol. VI, 1904, p. 809.

<sup>2</sup>Thompson J.J., *The Royal Institution Library of Sciences*, vol. 5, p. 36.

<sup>3</sup>Langevin P., “La Physique des électrons”, *Revue générale des sciences pures et appliquées*, vol. 16, 1905, p. 257.

<sup>4</sup>Текст этого доклада был опубликован по возвращении Пуанкаре в Париж в *La Revue des Idées*, 5 ноября, и в *Bulletin des Sciences mathématiques*, в декабре. Отрывок, озаглавленный «*Une image de l’Univers*» появился в *Bulletin de la Société astronomique de France* в январе 1905 г., и тогда же был опубликован его японский перевод.

<sup>5</sup>Nottale L., *La relativité dans tous ses états*, op. cit., ch. 4, p. 44. В своей работе автор дает прекрасное изложение доклада Пуанкаре.

## ... И создает пространство–время

### Посреди Атлантики Пуанкаре создает пространство–время

В конце сентября, по окончании конгресса, Пуанкаре вместе с Полем Ланжевеном отправляется поездом в Сан-Франциско. Эта поездка доставляет ему — заядлому путешественнику — большое удовольствие. А что уж говорить о Ланжевене, которому только что исполнилось 32 года и который пока ничего особого не достиг — для него это большая честь! Позднее он вспоминал: «За ту неделю, что мы провели на просторах северной Америки, я имел случай убедиться, насколько Пуанкаре интересовался революционными изменениями понятий, происходившими на самом фундаментальном уровне».<sup>1</sup>

В конце октября они вернулись в Нью-Йорк и сели на судно, отправлявшееся во Францию. Пересекая Атлантику, Пуанкаре не перестает думать о своем выступлении в Сен-Луисе. И где-то в Атлантике, между Нью-Йорком и Гавром, вызревает то, что спустя несколько недель станет «новой механикой», тем, что сейчас называется теорией относительности.

По возвращении он узнает, что в Париже недавно выступал Лоренц. Пуанкаре тут же пишет ему:

*«Уважаемый коллега,*

*Я очень сожалею, что мне не удалось послушать Ваше выступление ни, тем более, побеседовать с Вами в Париже.*

*В последнее время я еще раз внимательно изучил Вашу исключительной важности статью [...], основные результаты которой я привел в своем докладе в Сен-Луисе.*

*Я согласен с Вами по всем основным пунктам, однако в деталях имеются некоторые расхождения [...]*»<sup>2</sup>.

Спустя несколько дней или недель — точную дату установить невозможно, так как, следуя привычкам своего времени, Пуанкаре не ставил дат на письмах — в другом письме Лоренцу он изложил фундаментальную систему «новой механики». Два этих письма содержат существо того, что станет теорией относительности, и, тем самым, представляют собой своего рода ее «учредительный акт».

Есть указания на то, что уже тогда Пуанкаре пришел к выводу о необходимости ввести в свою теорию четырехмерное пространство, объединяющее три измерения пространства со временем — наше нынешнее пространство–время.<sup>3</sup>

### Четырехмерное пространство

Четырехмерное пространство! Именно о нем размышляет Пуанкаре...

Сразу же по возвращении в Париж он принимается за дело. 16 января он представляет в Академию наук доклад, в котором так подходит к этой проблеме:

«Сумма углов треугольника равна  $180^\circ$ , но для тетраэдра у нас нет аналогичной теоремы. Точно так же поверхность сферического треугольника пропорциональна сферическому избытку, но у нас нет никакой аналогичной

теоремы для гипersферического тетраэдра, расположенного на гипersфере четырехмерного пространства...». <sup>4</sup>

Чтобы заполнить эти пробелы, он показывает, что «первая из этих теорем может быть обобщена на все пространства с четным числом измерений, но не на пространства с нечетным числом измерений». Со второй теоремой все наоборот: «Ее можно обобщить на пространства с нечетным числом измерений, но не с четным числом».

После этого для него наступает очень короткая передышка — академические обязанности требуют его полного внимания. 1905 год был поворотным для Франции в разных сферах — в этом году Анри Бергсон пишет *Творческую эволюцию*, Шарль Мора — *Будущее разума*, а некто Пабло Пикассо после голубого периода арлекинов и розового периода акробатов начинает вместе со своим другом Браком изобретать кубизм... Что же касается Пуанкаре, то он для начала публикует две работы, которые потом будут считаться одними из самых крупных — первый том «Лекций по небесной механике», <sup>5</sup> названный *Общая теория возмущений движения планет*, и вторую (после *Науки и гипотезы*, опубликованной за три года до этого), предназначенную для широкого читателя книгу, названную *Ценность науки*. <sup>6</sup> Кроме того, он еще успевает следить за публикацией в *La Revue des idées* отрывка из одной из своих лекций в Сен-Луисе под заголовком «Образ вселенной», написать большую чисто математическую работу *Об арифметических инвариантах*, предисловие к работе американского астронома Джорджа Вильяма Хилла и несколько отчетов о разных премиях, присужденных Академией наук...

## Генезис открытия

Четыре недатированные письма Пуанкаре Лоренцу, написанные между октябрём 1904 г. и июнем 1905 г., позволяют, пусть частично, восстановить ход событий, приведших к созданию «новой механики» — теперешней теории относительности.

Перечитывая сейчас эти письма, ясно видишь, что отправной точкой для Пуанкаре являлась статья Лоренца 1904 года. Но в то же время, он рассматривал и две другие теории — Макса Абрагама и Поля Ланжевена, конкурировавшие с теорией Лоренца. В каждой из этих трех теорий электрон рассматривался по-разному: во всех электрон считался крошечной заряженной сферой, но Абрагам полагал ее недеформируемой, Лоренц считал, что она принимает форму «сплюсненного эллипсоида», а Ланжевен считал электрон деформируемым, но несжимаемым, так что его объем в движении «оставался постоянным».

Пуанкаре во всех этих теориях смущало то, что электрон оказывался нестабильным и должен был разваливаться. Поэтому сначала он принялся решать эту проблему, положив, что электрон ведет себя как «полая сфера, подверженная постоянному (отрицательному) внутреннему давлению, не зависящему от объема».

Скорее всего в мае он закончил работу, в которой рассмотрел эти вопросы, и в понедельник 5 июня 1905 г. представил короткую, всего в пять страниц заметку в Академию наук.

Международная обстановка тогда была очень напряженной. На протяжении ряда лет один человек практически единолично проводил внешнюю

политику Франции. Этим человеком был министр колоний, а затем министр иностранных дел Теофил Делкассе (Théophile Delcassé, 1852–1923), который подкрепил франко–русский договор, заключив 8 апреля 1904 г. соглашение с Великобританией, по сути изолировав тем самым Германию. Немецкий император упорно добивался его отставки, угрожая в противном случае войной.

Французы были поражены, узнав 6 июня о неожиданной и необъяснимой отставке их министра. Международная напряженность чуть спала.

Неудивительно, что в таких обстоятельствах заметка, отправленная Пуанкаре в Академию наук, не привлекла во Франции ни малейшего внимания. А ее автора тогда занимало совсем другое — большой любитель путешествий он уже давно предвкушал поездку в Швецию, где собирался побывать во второй раз — впервые он там был летом 1878 г. (По возвращении он даже написал роман, но больше к литературному сочинительству не обращался).

8 июня он покупает билет на «Северный экспресс» до Стокгольма, куда и прибывает 17 июня, где его принимает король Швеции. Затем он направляется в Норвегию, которая тогда была еще на пути к обретению независимости. В Париж он возвращается 4 июля и принимается за публикацию своей статьи.

Похоже, никто во Франции не горел желанием напечатать довольно объемистую (в 50 страниц) статью, посвященную «абстрактной» теме. Пуанкаре тогда пишет своему другу, жившему в Палермо, в Сицилии, математику Гуччия, основателю и редактору журнала *Circolo matematico*: «Дорогой друг, не вставьте ли вы в выпуск *Rendiconti* статью страниц в пятьдесят о динамике электрона?»

Пуанкаре уже и раньше печатался в *Circolo matematico*. Там в ноябре 1888 г. была опубликована его статья «Об одном свойстве аналитических функций», в марте 1894 г. — «Об уравнениях математической физики», а в марте 1899 г. дополнение к «*Analysis situs*». Но все эти три работы были из области чистой математики. Статья, озаглавленная «О динамике электрона», имела совсем другую направленность. Тем не менее, Гуччия дал свое согласие.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Langevin P., «Poincaré, le physicien», *Revue de Métaphysique et de Morale*, 21, 1913, pp: 618, 665.

<sup>2</sup>Рукописи писем Анри Пуанкаре Антону Лоренцу факсимильно воспроизведены в A.I. Miller, *Frontiers of Physics*, op cit., p. 12–16. «Расхождения в деталях», как мы вскоре увидим, на самом деле имеют первостепенное значение.

<sup>3</sup>Термин «пространство–время» был позднее введен профессором геттингенского университета Германом Минковским; мы еще к этому вернемся.

<sup>4</sup>Poincaré H., *Comptes rendues de séances de l'Académie des sciences*, t. 140, 1905, p. 113.

<sup>5</sup>Poincaré H., *Théorie générale des perturbations planétaires*, Gauthier-Villars, 1905, 367 p.

<sup>6</sup>Poincaré H., *La Valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1905. Пуанкаре А., *Ценность науки*, в Анри Пуанкаре, *О науке*, М. Наука, 1983.



## Пуанкаре приводит в порядок «преобразования Лоренца»

### Эталон краткости

В своей исторической заметке от 5 июня 1905 г. Пуанкаре на пяти страницах приводит четыре уравнения, пронумерованные от (1) до (4).<sup>1</sup> Крайне редко столь новые идеи излагаются так кратко... и почти без математических выкладок. (А ведь до сих пор физики упрекают Пуанкаре в излишней математизации своих идей!)

Озаглавленная «О динамике электрона», эта заметка содержит введение, за которым следует изложение фундаментальных основ новой механики. В последней части Пуанкаре формулирует дерзкое предположение, касающееся гравитации: «Распространение сил тяготения происходит не мгновенно, а со скоростью света», сокрушая тем самым последний бастион системы мира Ньютона. Вместе с письмами Лоренцу, посланными месяцем раньше, эта заметка есть основа того, что теперь называется «специальной» теорией относительности.

В 1899 г. Пуанкаре читал в Сорбонне курс лекций по «Новым теориям электродинамики». Он поочередно излагал студентам все популярные в то время теории электродинамики, в частности, теорию Лоренца (в том виде, как она была тогда сформулирована) и теорию Лармора. На первой лекции он заявил, что «хотя ни одна из теорий не представляется мне полностью удовлетворительной, каждая из них, возможно, содержит элемент истины, и их сравнение может быть весьма полезным». На последней лекции он сказал, что из всех теорий именно теория Лоренца, похоже, лучше всего учитывает фактическое положение дел,<sup>2</sup> и выразил надежду на ее совершенствование.

Именно это и удалось, хотя лишь частично, сделать Лоренцу в 1904 г. Полученные результаты пришлось по душе Пуанкаре и он решил заняться этой проблемой. Для лучшего понимания его подхода нужно иметь в виду следующее: за исходный пункт он принял работы Лоренца. В частности, он позаимствовал у Лоренца некоторые слова и выражения. Однако *из этого не следует, что Пуанкаре полностью согласился с понятиями и выражениями Лоренца*; это совершенно не так.

### По Лоренцу, эфир «неподвижен», но существует ли он на самом деле?

Всю жизнь Лоренц твердо верил в реальное существование эфира, той «среды, в которой распространяется свет и которая заполняет всю вселенную». В своей заметке для Академии наук от 5 июня Пуанкаре использует слово «эфир» лишь однажды: «На первый взгляд кажется, что абберрация света и связанные с ней оптические и электрические явления дают нам средство для определения абсолютного движения Земли или, вернее, ее движения не по отношению к другим небесным телам, а по отношению к эфиру».

С почтением относясь к Лоренцу, Пуанкаре избегает слов «эфир не существует». Вместо этого он предполагает, что «невозможно продемонстрировать абсолютное движение Земли по отношению к эфиру». Иными словами, если эфир и существует в действительности, то он хорошо «спрятан»,

настолько хорошо, что его нельзя обнаружить в оптических или электродинамических экспериментах. Но только это и имеет значение для Пуанкаре.

С точки зрения Лоренца, эфир существует «на самом деле» и он «неподвижен» в пространстве. В «покоящейся» по отношению к эфиру системе отсчета часы, которыми пользовались физики со времен Галилея для измерения времени, указывают «истинное» время. В системе «движущейся» по отношению к эфиру, часы показывают «местное время». Пуанкаре выходит за рамки этих представлений. Развивая идеи Лоренца, он рассматривает одну систему «до преобразования» и другую систему «после преобразования»: если часы в одной из них показывают «истинное» время, то часы другой — «местное» время и наоборот. Ни одна из этих систем не является «неподвижной» относительно эфира, поскольку «невозможно продемонстрировать абсолютное движение по отношению к эфиру»! Эфир, таким образом, есть лишь *слово*, от которого Пуанкаре не отказывается из уважения к Лоренцу.

### Самое главное...

Уже самой первой своей публикацией Анри Пуанкаре устанавливает странную традицию, которой он придерживался всю жизнь — приписывать свои заслуги другим. По-видимому, это было результатом смеси скромности, застенчивости, а иногда и простой забывчивости. Как рассказывал Поль Аппель, во многих работах Пуанкаре присваивал теоремам имена математиков, которые не имели к ним никакого отношения.<sup>3</sup>

Во введении к своей заметке от 5 июня Пуанкаре вкратце резюмирует свой «принцип относительности» — невозможность продемонстрировать абсолютное движение есть общий закон природы. А далее следует чрезвычайно щедрый подарок когда-либо сделанный «математиком» своему коллеге «физику». «Идея Лоренца состоит в том, что уравнения электромагнитного поля не изменятся в результате некоторого преобразования (которое я назову именем Лоренца) следующего вида»... Здесь ключевое слово — преобразование.

При построении своей модели электрона Лоренц придумал *замену переменных*, которая позволила преобразовать «движущийся» электрон в (фиктивный) неподвижный электрон — с ним было легче иметь дело. Но как бы остроумно она ни выглядела, замена переменных есть лишь математический прием, представляющий интерес постольку, поскольку он позволяет получить желаемый результат. Пуанкаре отказывается от такого рассмотрения и предлагает свой новаторский подход, который войдет в нарождающуюся физику XX века.

При его подходе слово «преобразование» означает не скромную «замену переменных» Лоренца, а преобразование всего пространства — каждой точке рассматриваемого пространства (известного сейчас как четырехмерное пространство-время) данное преобразование ставит в соответствие другую точку того же пространства. Пуанкаре предстает здесь как физик-новатор, и с помощью расширенного таким образом понятия преобразования строит механику невиданного до того типа. В ней привычная скорость  $v$  заменяется «параметром», задающим данное преобразование: « $x, y, z$  — координаты [пространства-времени] и  $t$  — время до преобразования, а  $x', y', z'$  и  $t$  — после преобразования».

Такая формулировка становится возможной благодаря смелости, с которой Пуанкаре использует свою систему записи: он полагает равной 1 максимально достижимую в его теории скорость. Это есть скорость света, а потому он полагает  $c = 1$ . При такой записи параметр  $\varepsilon$ , задающий преобразование, соответствует скорости  $v$  в классической формулировке.

Кинематика без явно заданной «скорости», да еще и содержащая «параметр» и «преобразование»... все это могло сбить с толку физиков, еще не привыкших к новому физическому языку, использованному Пуанкаре.

Вернемся к записанным Пуанкаре уравнениям преобразований, которым он тут же дал имя Лоренца. Пуанкаре записывает их в краткой форме:

$$x' = kl(x + \varepsilon t), \quad t' = kl(t + \varepsilon x),$$

где указаны лишь координаты пространства и времени:  $x$  и  $t$  «до» преобразования и  $x'$  и  $t'$  «после» преобразования. Координаты  $y, z$  и  $y', z'$  здесь роли не играют. В этих уравнениях, говорит Пуанкаре, « $\varepsilon$  — константа, которая определяет преобразование,  $k = 1/\sqrt{(1 - \varepsilon^2)}$ , а  $l$  — некоторая функция  $\varepsilon$ ».

В интересах дальнейшего изложения отметим, что определенное таким образом преобразование зависит от двух параметров,  $\varepsilon$  и  $l$ , причем второй параметр есть некоторая функция первого. Дальше мы увидим, как Пуанкаре показал, что  $l$  нужно принять равным единице, тем самым устранив один из параметров.

Итак, в руках Пуанкаре уравнения преобразований «Лоренца». Что же он с ними станет делать?

Для начала он обращается к фундаментальной проблеме, которая была не до конца разрешена Лоренцем в его статье 1904 г. — как преобразование влияет на электрические заряды и токи.

## Как преобразовать заряд электрона

Использованный Лоренцем метод замены переменных позволяет преобразовывать координаты пространства и времени, но, как мы видели, *представляет интерес с точки зрения электродинамики*, только если он дополняется «законом», задающим способ преобразования электрических зарядов и токов.

Этот закон Пуанкаре формулирует независимо от всего остального. Для этого он вводит гипотезу, которую позднее назовет «основной гипотезой новой электродинамики»: «Если мы желаем, чтобы заряд электрона не изменялся от преобразования, то, обозначая через  $\rho'$  новую плотность электричества, будем иметь:  $\rho' = k\rho(1 + \varepsilon u)/l^3$ », где  $u$  есть скорость электрона по оси  $x$ . Лоренц дал неверное выражение:  $\rho' = \rho/kl^3$ .

А как обстоит дело с током? Пуанкаре уже отмечал, что согласно Рюланду, «движущийся заряд эквивалентен току». Ток, вызываемый движением заряда, тогда есть  $ru$ . Пуанкаре вычисляет скорость электрона  $u'$  после преобразования, как функцию скорости до преобразования. Эта скорость равна  $dx'/dt'$ , то есть  $(u + \varepsilon)/(1 + \varepsilon u)$ .

Для того чтобы вывести закон преобразования для электрического тока, Пуанкаре применяет свои формулы  $\rho' = k\rho(1 + \varepsilon u)/l^3$  и  $u' = (u + \varepsilon)/(1 + \varepsilon u)$ , что дает  $\rho'u' = k\rho(1 + \varepsilon)/l^3$ , или что проще  $\rho'u' = k\rho(1 + \varepsilon)$ , если положить  $l = 1$ . Пуанкаре сделает это чуть позже, получив тот же результат, что и

Лоренц. Правда, Лоренц пришел к нему в результате двух компенсирующих друг друга ошибок. Пуанкаре по этому поводу замечает: «Эти формулы несколько отличаются от предложенных Лоренцем».

В более явном виде для этих двух выражений получаем,<sup>4</sup> соответственно,  $\rho' = k(\rho + \epsilon u)$  и  $\rho u' = k(\rho u + \epsilon \rho)$ . Поместим их под уравнениями преобразования пространства и времени:

$$\begin{array}{cc} t' = k(t + \epsilon x) & \text{и} & x' = k(x + \epsilon t) \\ \rho' = k(\rho + \epsilon u) & \text{и} & \rho u' = k(\rho u + \epsilon \rho) \end{array}$$

Там, где в верхней строке находится  $t$ , в нижней строке имеется  $\rho$ ; там, где в верхней строке находится  $x$ , в нижней строке имеется  $\rho u$ . Таким образом, пара  $t, x$  в верхней строке играет ту же роль, что пара  $\rho, \rho u$  в нижней строке.

Это не ускользнуло от внимания Пуанкаре, который сделал из этого поразительные даже сегодня выводы. Он берет любое число  $\lambda$  (которое математики называют «неопределенным множителем») и образует функции  $t + \lambda \rho$  и  $x + \lambda \rho u$ . Он замечает, что соответствующие функции  $t' + \lambda \rho'$  и  $x' + \lambda \rho' u'$  имеют, вместе с функциями до преобразования, те же соотношения, что  $t'$  и  $x'$  имеют с  $t$  и  $x$ . Это означает, что  $\rho, \rho u$  не единственная пара, которая преобразовывается так же, как пара  $t, x$ . Все пары, содержащие  $x, t, \rho$  и  $\rho u$  преобразовываются точно так же. Какое же фундаментальное понятие за этим скрывается?

## Преобразование потенциалов

У Пуанкаре была потрясающая интуиция. «Когда его просили ответить на трудный вопрос, — рассказывает хорошо его знавший Гастон Дарбу, — он отвечал с быстротой молнии».<sup>5</sup> И в самом деле, все что делал Пуанкаре кажется очень простым, как бы элементарным, если даже не все могут понять некоторые детали. Это могло проистекать только из почти мгновенного понимания, которое дает прекрасная интуиция, как и было в данном случае.

Продемонстрировав, как преобразовывать электрические заряды и ток, Пуанкаре далее объясняет, как преобразовывать создаваемый электроном потенциал. Он убежден, что  $\varphi$  и  $A_x$  образуют — должны образовывать — еще одну пару того же типа, что и найденные им ранее. Подставляя вместо  $x$  и  $t$  другую пару  $\varphi$  и  $A_x$ , он получает:  $\varphi' = k(\varphi + \epsilon A_x)$ ,  $A'_x = k(A_x + \epsilon \varphi)$ , «уравнения преобразования потенциала».

Итак, он получает в свое распоряжение уравнения преобразования координат пространства и времени, электрических зарядов и токов, и потенциалов, создаваемых зарядами и токами. Из уравнений преобразования потенциала он выводит уравнения преобразования напряженности электрической составляющей  $E$  и магнитной составляющей  $B$ . Остается лишь убедиться, что все преобразования вместе дают правильные результаты.

Он подвергает все пять уравнений своей теории электрона тому, что отныне называет «преобразованиями Лоренца» (хотя на самом деле это преобразования Пуанкаре!) и проверяет полученные результаты. Все уравнения, содержащие штрихованные переменные, выглядят совершенно так же, как и исходные уравнения до преобразования. Лоренцу получить этот результат так и не удалось.<sup>6</sup>

Лишь спустя два года после выхода в свет этой статьи ее обнаружит геттингенский математик Герман Минковский, который полностью оценит всю ее важность и начнет пропагандировать ее идеи так настойчиво и с такой убежденностью, что эти идеи начнут приписывать ему самому! А ведь мы пока познакомились лишь с несколькими первыми страницами первой части статьи Пуанкаре!

## Полная победа

Рассуждения Пуанкаре в этой статье идут как бы на двух пересекающихся уровнях: с одной стороны, они закладывают основы теории относительности, а с другой стороны, образуют теорию электрона. Даже век спустя теория относительности не претерпела изменений, тогда как электродинамика электрона постоянно развивалась, превратившись в конце концов в современную квантовую электродинамику, которая считается самой точной из когда-либо созданных физических теорий.<sup>7</sup>

Давайте сначала проследим, как Пуанкаре пришел к созданию понятия пространства-времени, а затем вернемся к электродинамике.

Не удовлетворившись тремя парами параметров  $t$  и  $x$ ,  $\rho$  и  $\rho u$ ,  $\varphi$  и  $A$ , которые преобразовываются по одному типу  $X' = k(X + \epsilon Y)$ ,  $Y' = k(Y + \epsilon X)$ , Пуанкаре тут же обнаруживает общее свойство всех трех пар — каждая из них образует составляющие чего-то существующего в *пространстве четырех измерений*. *Ktêma eis aei!*<sup>8</sup>

Он принимается за изучение этого пространства, используя математические методы, специально придуманные для такого рода исследований. А ведь он, как по заказу, еще и один из лучших в мире специалистов в этой области...

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Poincaré H. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. CXL, 1905, p. 1504.

<sup>2</sup>Poincaré H., *Electricité et Optique*, op. cit., «Avertissement», p. i.

<sup>3</sup>Appell P., *Henri Poincaré*, op. cit., p. 88.

<sup>4</sup>Если в это выражение подставить  $c^2$ , то оно приобретает вид  $(u + v)/(1 + uv/c^2)$ .

<sup>5</sup>Darboux G., *Éloge historique d'Henri Poincaré*, прочитано на годовичном публичном заседании Академии наук 15 декабря 1913 г. Воспроизводится в томе II трудов Пуанкаре (*Oeuvres d'Henri Poincaré*, Paris, Gauthier-Villars, 1916).

<sup>6</sup>По той простой причине, что правило сложения скоростей и закон преобразования заряда, полученные Лоренцом, неверны. Занятно, что они, тем не менее, приводят к правильному результату для закона преобразования тока, поскольку обе ошибки взаимно компенсируются.

<sup>7</sup>Чтобы дать представление о совершенстве этой теории, достаточно повторить пример, приведенный Ричардом Фейнманом: теория позволяет рассчитать некоторые характеристики электрона с точностью, которая соответствует измерению расстояния между Лос-Анджелесом и Нью-Йорком с точностью до ширины волоса (Ричард Фейнман, выступление на конференции в Калифорнийском университете Лос-Анджелеса, май 1983 г.).

<sup>8</sup>«Полная победа». Эта цитата из *Пелопонесской войны* Фукидида стала гордым девизом курсантов Школы военно-воздушных сил в Салон-де-Прованс, который я, с их любезного согласия, одолжил.

## Пуанкаре вторгается в физику XX века

### Грандиозная идея

По моему мнению, одна из самых глубоких идей, привнесенных Пуанкаре в научную философию (наряду с его «принципом относительности»), такова: «В нашем уме предсуществовала скрытая идея известного числа групп».<sup>1</sup> Далее он задает вопрос: «Какую из них мы выберем в качестве как бы эталона, с которым будем сравнивать реальные явления?», и отвечает: «В силу естественного отбора наш ум *приспособился* к условиям внешнего мира, и он усвоил себе геометрию, *наиболее выгодную для вида*, или, другими словами, *наиболее удобную*».

Здесь Пуанкаре сначала говорит о «группе», а потом о «геометрии». Очевидно, что в его представлении они связаны между собой. Здесь мы вновь сталкиваемся с фундаментальными положениями «Эрлангенской программы» (см. выше, с. 24), а потому предлагаем читателю вернуться к тем страницам, прежде чем продолжить чтение.

Слова *группа* в его современном понимании впервые родилось в часы ночных размышлений юного математика Эвариста Галуа, когда он был семнадцатилетним гимназистом лицея Луи-ле-Гран в Париже. Трагическая гибель в возрасте двадцати лет не позволила ему развить свои идеи.<sup>2</sup> В 1905 г. лишь самые просвещенные физики были в курсе его представлений.

Когда Пуанкаре говорит, что понятие группы «предсуществовало» в нашем уме, он имеет в виду, что это основа наших представлений о структуре окружающего мира. Это и есть (по моему мнению) один из его крупных вкладов в развитие философии науки.

### Преобразования Лоренца образуют группу!

Если «действие» есть душа физики, то «теория групп» — ее тело. Оба равно необходимы, чтобы проникнуть в загадки окружающей нас вселенной. В статье от 5 июня Пуанкаре писал: «Лоренц установил важный момент, а именно то, что уравнения электромагнитного поля не изменяются при определенного рода преобразованиях (которые я назову именем Лоренца) [...]», и несколькими строками ниже добавил: «ансамбль всех этих преобразований [...] должен образовывать группу».

Все мы в свое время, играя и резвясь, научились в школе четырем арифметическим действиям: сложению, вычитанию, умножению и делению, не говоря уж об извлечении корня и прочих премудростях. Однако очень жаль, что наши достойные учителя не научили нас еще более простой арифметике. В ней есть лишь одно действие, но оно во многих отношениях гораздо мощнее обычных арифметических действий. Я говорю о теории групп.

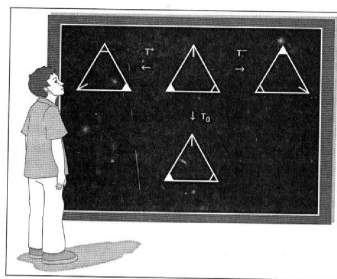
На языке математики для того, чтобы иметь *группу* требуются:

1. *элементы* (называемые также членами группы)
2. *закон образования группы*.

Рассмотрим очень простой пример. Возьмем группу, образованную четырьмя числами:  $1, -1, i$  и  $-i$ , где  $i$  есть число, задаваемое выражением  $i \times i = -1$ . В качестве закона образования возьмем обычное умножение. Если  $T$  и  $T'$  есть два элемента группы, то результат умножения  $T$  на  $T'$ ,

согласно принятому нами закону образования, есть также элемент группы. Возьмем, например, элемент  $-1$  и элемент  $i$ . Их произведение дает  $-1 \times i = -i$ , то есть элемент группы.

Приведенный пример иллюстрирует основное понятие группы — мы имеем группу, когда произведение двух элементов группы снова дает элемент группы. Это задает тесную и *единственную* (поскольку у нас только один закон образования) связь между элементами группы. Тот факт, что *единственная* операция, а не четыре обычных арифметических действия, задана для группы, делает понятие группы исключительно мощным. Единственная *операция* — закон образования группы — есть сама душа группы. Надеюсь, что постепенно читатель поймет и оценит важность и красоту этой теории.



При повороте равностороннего треугольника вокруг его центра он возвращается в исходное положение. Множество трех возможных преобразований — одно из которых, обозначенное здесь  $T_0$ , оставляет треугольник в исходном положении — образует группу в математическом смысле этого слова. Используемое Пуанкаре при анализе преобразований Лоренца понятие группы позволило ему быстро и надежно заложить математический фундамент теории относительности.

Для того, чтобы преобразования Лоренца образовывали группу, необходимо чтобы результат двух преобразований Лоренца также был преобразованием Лоренца.

Проверим, так ли это. Назовем  $T_k$  преобразование  $x' = k(x + \varepsilon t)$ ,  $t' = k(t + \varepsilon x)$ . Произведение  $T_k$  и  $T'_k$  дает преобразование  $T''_k$ , для которого  $k'' = kk'(1 + \varepsilon\varepsilon')$ . Это есть также преобразование Лоренца.<sup>3</sup>

На данном этапе принятый Пуанкаре математический подход дает ему преимущество — не имеет значения, что  $x$  представляет пространство, а  $t$  время. *Вместе*  $x$  и  $t$  есть координаты точки в понятийном «пространстве» двух измерений (его можно было бы назвать «фиктивным» пространством Лоренца), и преобразования Лоренца есть «точечные» преобразования этого пространства!

Не останавливаясь на достигнутом, Пуанкаре идет дальше и вступает в волшебный мир *бесконечно малых преобразований*.

Пусть имеется окружность в пространстве двух измерений. Некоторые преобразования такого пространства не изменяют геометрических свойств окружности (например, длина окружности, пропорциональная радиусу, останется после преобразования неизменной). Назовем преобразования такого типа *основной группой*.

Согласно теореме Софуса Ли, основная группа пространства  $n$  измерений зависит от  $n(n+1)/2 + 1$  параметров. У привычного нам пространства таких параметров  $3(3+1)/2 + 1 = 7$  («семь столпов премудрости»!\*). Это означает, что каждое из преобразований может быть образовано, исходя из семи преобразований, выбранных по критерию простоты. Это будут: три *перемещения* (по одному на каждое измерение пространства), что дает три параметра, одно *вращение* относительно исходного положения (зависящее от трех углов), что дает еще три параметра, и одна *гомотетия* (*сокращение* или *увеличение* длины) вида  $x' = lx, y' = ly, z' = lz$ , что дает последний седьмой параметр.

В 1883 г. Софус Ли предложил другой — более утонченный — способ определения основной группы, в котором в качестве параметров образования группы используются *бесконечно малые* преобразования (естественно, принадлежащие к той же группе). Применяя этот метод для образования группы преобразований Лоренца, Пуанкаре пишет: «[Положим]  $\varepsilon$  бесконечно малым и получим  $x = x' + \varepsilon t, t' = t + \varepsilon x$ ». Это есть бесконечно малое преобразование: таким образом, моменту времени  $t$  ставится в соответствие положение  $x$ , а моменту времени  $t + \varepsilon x$  ставится в соответствие положение  $x + \varepsilon t$ , причем они могут быть как угодно близки к точке  $x, t$ .<sup>4</sup>

[Прежде чем двигаться дальше, стоит полюбоваться простотой и элегантностью этого результата, который показывает, что для перехода из одной точки *пространства* в бесконечно близкую к ней другую, нужно прибегать... ко *времени*! А для перехода из одного момента *времени* в бесконечно близкий к нему другой, нужно прибегать... к *пространству*! Ни одно изложение теории относительности не может быть более ясным — и более верным — чем эти выражения, полученные скромными методами *математики*.]

Назовем упомянутое выше бесконечно малое преобразование  $T_1$ . К  $T_1$  Пуанкаре добавляет преобразования  $T_2$  и  $T_3$ , где  $y$  и  $z$  играют ту же роль, что  $x$  в  $T_1$ . К этим трем преобразованиям он добавляет *простейшее*<sup>5</sup> бесконечно малое преобразование, которое он называет  $T_0$ . Это позволяет получить четыре из семи искомых параметров. Остальные три он выбирает в форме трех бесконечно малых вращений относительно осей  $x, y$  и  $z$ , соответственно,  $R_x, R_y$  и  $R_z$ .

И тут Пуанкаре пишет историческую фразу: «Любое преобразование такой группы всегда сможет свестись к преобразованию вида  $x' = lx, y' = ly, z' = lz, t' = lt$  с последующим линейным преобразованием, не изменяющим квадратичную форму  $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$ ».<sup>6</sup>

Преобразования Лоренца оставляют *инвариантной* квадратичную форму  $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$ . Это означает, что если вместо  $x, y, z, t$  в квадратичную форму подставить  $x', y', z', t'$ , получится просто-напросто  $x'^2 + y'^2 + z'^2 - t'^2$ . Квадратичная форма сохраняет свой вид.

Но что же это такое — квадратичная форма?

## Вернемся к теореме Пифагора

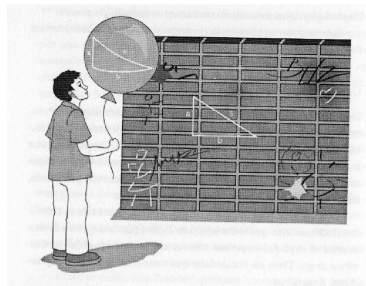
Начертим на плоской поверхности прямоугольный треугольник с гипотенузой  $s$  и сторонами  $a$  и  $b$ . Каково бы ни было положение этого треуголь-

\* В Библии, *Притчи 9:1*, говорится: «Премудрость созда себе дом и утверди столпов седмь». — (прим. перев.)



ника на плоскости, три его стороны связаны соотношением  $s^2 = a^2 + b^2$ . Это — теорема Пифагора. Но раз уж мы записались в математики, то чтобы глубже проникнуть в секреты этой науки, запишем теорему в виде  $a^2 + b^2 - s^2 = 0$ . Слева у нас не что иное, как *квадратичная форма*! Более того, как и в форме, полученной Пуанкаре, у нас имеется член со знаком минус.

Чтобы понять, что скрывается за этой формулой, заменим  $a^2$  на  $x^2$ ,  $b^2$  на  $y^2$  и  $s^2$  на  $c^2t^2$ . Эта простая подстановка новых переменных приводит к формуле  $x^2 + y^2 - c^2t^2$ , а если наш треугольник расположен не на плоскости, а в пространстве, то получим  $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$ . Это один к одному квадратичная форма Пуанкаре!



Гипотенуза  $s$  и катеты  $a, b$  прямоугольного треугольника на плоскости связаны соотношением  $s^2 = a^2 + b^2$  — это теорема Пифагора. Если же треугольник нанесен на искривленную поверхность, в данном случае на сферу, теорема Пифагора также справедлива, но в обобщенном виде, предложенном Гауссом. Его метод стал фундаментальным приемом, применяемым при рассмотрении пространства-времени.

Иными словами, за маской квадратичной формы Пуанкаре скрывается теорема Пифагора в применении к пространству-времени.

Некоторые критики попрекали Пуанкаре тем, что в своей статье он не подчеркнул *в явном виде* важность обнаруженного им *с физической точки зрения*. В самом деле, Пуанкаре удовлетворяется лишь напоминанием о том, что его квадратичная форма есть *инвариант* относительно преобразований Лоренца. Но ведь для него (что видно и из его формулировок) понятие формы — одно из самых возвышенных! Ведь все его первые теоретические исследования 1879–1881 гг. назывались так: *О некоторых свойствах квадратичных форм*,<sup>7</sup> *Об одновременной редукции квадратичной и линейной форм*,<sup>8</sup> *О новом методе геометрического представления квадратичных форм*,<sup>9</sup> *О применении неевклидовой геометрии к теории квадратичных форм*.<sup>10</sup> Квадратичные формы, с таким блеском изучавшиеся его бывшим преподавателем в Сорбонне Шарлем Эрмитом, имеют для него исключительную важность.

Читатель вполне может задать вопрос: ну и что? Ну образуют преобразования Лоренца группу, и что с того? Какая разница?

Разница огромная! *Семь бесконечно малых преобразований* достаточны для определения *всей* группы — можно забыть о самих преобразованиях и сосредоточиться только на бесконечно малых преобразованиях, которые гораздо легче исследовать!<sup>11</sup>

## Мнимая координата времени

Координата времени входит в квадратичную форму Пуанкаре в виде, отличном от трех пространственных координат — перед ней единственной стоит знак минус. С математической точки зрения было бы приятнее — удобнее — если бы этот знак стал *плюсом*. Для решения такого рода проблем у математиков есть масса приемов.

Декарт первым в малоизвестном месте своей *Геометрии* (1637 г.) заявил, что любое алгебраическое уравнение степени  $n$  имеет  $n$  корней, и объяснил как найти их для уравнения третьего порядка. Вот его объяснение, данное в понятиях, которые теперь уже не применяются: «В общем, как истинные корни [следует понимать *положительные* корни], так и ложные [следует понимать *отрицательные* корни] не всегда реальны, но иногда лишь мнимы: то есть их всегда можно вообразить для упомянутых мной уравнений, но притом нет какого-либо количества, которое соответствовало бы тому, что можно вообразить».<sup>12</sup>

Выражаясь современным языком, Декарт проводит различие между вещественными числами (положительными и отрицательными), квадраты которых положительны, и мнимыми числами (положительными и отрицательными), квадраты которых отрицательны.

Хотя в повседневной жизни мы нечасто сталкиваемся с числами, квадрат которых отрицателен, для математика это такие же числа, как и всякие другие. Единственное их отличие в том, что их квадрат отрицателен. Самое простое мнимое число — это *мнимая единица*  $i$ , квадрат которой есть  $-1$ , то есть  $i = \sqrt{-1}$ .

Но вернемся к Пуанкаре. Чтобы избавиться в квадратичной форме от мешающего ему знака минус, он заменяет пространственную координату новой *мнимой координатой*  $it$ . Это сразу устраняет трудности, ведь если взять ее квадрат  $(it)^2$ , получается  $-t^2$ , что и требовалось!<sup>13</sup> Две буквы  $it$  символизируют сделанное им открытие — открытие пространства-времени.

«Будем считать  $x, y, z, it$  [...] координатами [точки] в пространстве четырех измерений. Мы видим, что преобразование Лоренца есть лишь вращение этого пространства вокруг начала координат, считающегося неподвижным». Открытие пространства-времени целиком содержится в этих двух блестящих предложениях в заключительной части статьи. Все наконец становится предельно ясно: совместно пространство и время образуют четырехмерное пространство с геометрией специального вида. Одно из его измерений отличается от трех остальных тем, что ему соответствует мнимая координата.

«Все происходит так, — скажет Пуанкаре несколько лет спустя, — как если бы время было четвертой координатой пространства, и как если бы это четырехмерное пространство [...] могло вращаться не только относительно одной из осей обычного пространства, так чтобы время не изменялось, но и вокруг любой другой оси».<sup>14</sup>

### $l = 1$

Остается уладить одну деталь — почему в уравнениях преобразований Лоренца нужно брать  $l = 1$ ?<sup>15</sup> Этот вопрос интересен с двух точек зре-

ния: во-первых, с точки зрения элегантности данного Пуанкаре ответа, во-вторых, с точки зрения последовавших позднее комментариев.

Продemonстрировав как образовать «группу Лоренца» из бесконечно малых преобразований, Пуанкаре объясняет: «Можно образовать нашу группу и иным образом. Любое преобразование группы можно рассматривать как преобразование вида  $x' = kl(x + \varepsilon t), t' = kl(t + \varepsilon x)$ , которому предшествует и за которым следует соответствующее вращение».

И далее следует тонкий и решающий аргумент: «Но для наших целей следует рассматривать лишь часть преобразований этой группы. Мы должны положить, что  $l$  есть функция  $\varepsilon$ , и потому выбирать эту функцию таким образом, чтобы упомянутая часть группы, которую я назову  $P$ , также образовывала группу».

Пуанкаре обеспечивает справедливость своего аргумента в два этапа.

*Первое.* «Повернем систему на  $180^\circ$  вокруг оси  $y$ .<sup>16</sup> Так мы найдем преобразование, которое по-прежнему должно принадлежать  $P$ ; [...] мы найдем также, что  $x' = kl(x + \varepsilon t), t' = kl(t + \varepsilon x)$ . Таким образом,  $l$  не меняется при замене  $\varepsilon$  на  $-\varepsilon$ ».

*Второе.* «С другой стороны, если  $P$  есть группа, обратная подстановка  $x' = kl(x + \varepsilon t), t' = kl(t + \varepsilon x)$ , которая записывается  $x' = k(x - t)/l, t' = k(t - x)/l$ , также должна принадлежать  $P$ . Иначе говоря, она должна быть идентичной  $x' = kl(x - \varepsilon t), t' = kl(t - \varepsilon x)$ , то есть  $l = 1/l$ . Отсюда получаем  $l = 1$ ».

Столь простое рассуждение, приводящее к столь блестящему результату — это нечто неслыханное! А вот американский профессор Артур Миллер, тем не менее, заявляет: «Данное Пуанкаре доказательство того, что  $l = 1$ , хотя и более элегантно, чем доказательство Лоренца, но все же основывается на той же гипотезе, что и у Лоренца — гипотезе неэквивалентности систем  $S$  и  $S'$ . Это следует из его толкования уравнений преобразования Лоренца, базирующемся исключительно на математике, то есть на теории групп».<sup>17</sup>

На самом деле, в статье Пуанкаре предполагаемой *неэквивалентностью* двух рассматриваемых систем и не пахнет. Напротив, Пуанкаре прямо указывает, что если можно переходить от одной системы к другой — *причем в любом направлении* — то именно потому, что они эквивалентны.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Poincaré H., «*L'Expérience et la géométrie*». Анри Пуанкаре, *О науке*, с. 62, М. Наука, 1983 г., напечатано также в *La Science et l'Hypothèse*, op. cit., p. 107.

<sup>2</sup>См., например, J.-P. Auffray, *Evariste*, Aléas, 2004.

<sup>3</sup>Результат двух преобразований Лоренца  $T$  и  $T'$  получается при применении преобразования  $T'$  к результату преобразования  $T$ . Это определяет закон образования группы. Есть еще два понятия, дополняющие понятие группы:

— наша группа содержит элемент, обладающий свойством, которого нет у других. Это элемент  $1$ , поскольку каким бы ни был другой элемент группы  $1 \times T = T$ . Элемент, обладающий таким свойством называется единичным элементом группы;

— каждому элементу нашей группы соответствует элемент, обратный ему. Если есть некий элемент группы, то обратный ему определяется как  $T \times T' = I$ , где  $I$  есть в общем случае единичный элемент группы. В нашем примере  $1$  есть число обратное себе, так как  $1 \times 1 = 1$ ;  $-1$  также число обратное себе, и т.д.

<sup>4</sup>Если  $\varepsilon$  очень мало, можно принять  $k = 1$ , что дает приведенные формулы.

<sup>5</sup>То есть такое, при котором  $\varepsilon = 0$  и  $l = l + dl$ , что приводит к преобразованию  $dx = xdl$ ,  $dt = tdl$ .

<sup>6</sup>Напомним, что Пуанкаре полагал  $c = 1$ . При подстановке в квадратичную форму она приобретает вид  $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$ .

<sup>7</sup>Poincaré H., *Comptes rendues de séances de l'Académie des sciences*, t. 89, 1879, p. 344.

<sup>8</sup>*Ibid.*, t. 91, 1880, p. 844.

<sup>9</sup>Poincaré H., *Journal de l'École polytechnique*, 47 с., 1880, p. 177.

<sup>10</sup>Poincaré H., *Comptes rendues des sessions de l'Association française pour l'avancement des sciences*, 10 session, Алжир, 16 апреля 1881 г., p. 132.

<sup>11</sup>Профессор Артур Миллер (Arthur I. Miller) в своем «Исследовании статьи Анри Пуанкаре *О динамике электрона*», (*Archive for History of Exact Science*, Springer-Verlag, vol. 10, no. 3-7, 1973), например, пишет: «Важность этого результата, который для Пуанкаре был лишь простой квадратичной формой, была замечена через год, в 1907 г. [*sic*] Минковским». (Ссылка 184, стр. 262.)

<sup>12</sup>Descartes R., *Géométrie*, 1637, книга III, p. 380. Он приводит следующий пример: «Хотя можно вообразить три корня для  $x^3 - 6xx + 13x - 10 = 0$  [вместо  $x^2$  Декарт писал  $xx$ ], есть только один реальный, а именно 2, а два других, что к ним ни прибавить, ни на них умножить, ни от них отнять, не дают результата иначе как воображаемого». Это уравнение имеет корень 2, поэтому его можно переписать как  $(x - 2)(ax^2 + bx + c) = 0$ . Сравнивая с исходным уравнением, получаем  $a = 1, b = -4, c = 5$ . Тогда уравнение записывается как  $(x - 2)(x^2 - 4x + 5) = 0$ . Два мнимых корня есть решения уравнения  $x^2 - 4x + 5 = 0$ , а именно  $x = 2 + i$  и  $x = 2 - i$ . Теперь такие числа называют комплексными, а не мнимыми, оставляя название мнимых за числами, которые не содержат вещественной части, например  $2i$ .

<sup>13</sup>Проверяем:  $it \times it = i^2 t^2 = -t^2$ .

<sup>14</sup>Poincaré H., *L'Espace et le temps*, доклад на конференции в Лондоне 4 мая 1912 г., приводится по *Dernière Pensées*, Flammarion, 1917, p. 53. Эйнштейн долго противился такому подходу. Ни в одной из статей, написанных им в период с 1902 по 1909 г., не встречается мнимая единица. Впервые она употребляется в статье «*Le principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne*», опубликованной в 1910 г. в *Archives des sciences physiques et naturelles*, vol. 29: «Две системы уравнений отличаются лишь третьим знаком. Однако от этого различия можно избавиться, если использовать, следуя Минковскому, переменную  $ict$  вместо  $t$ , где  $i$  есть мнимая единица». Далее Эйнштейн возводит  $ict$  в квадрат и мнимая единица больше у него уже не появляется. Нет ее и в последующих статьях Эйнштейна, по крайней мере, вплоть до 3 ноября 1911 г., а дальше я уже не проверял.

<sup>15</sup>Пытаясь вывести уравнения для *продольной* и *поперечной* масс электрона в квазистационарном приближении Абрагама, Лоренц обнаруживает, что  $l$  нужно принять константой. Однако, для  $v = 0, l = 1$ . Одним словом, гомотетия в таком выводе невозможна.

<sup>16</sup>Это изменяет знак  $x, x', z$  и  $z'$ .

<sup>17</sup>Miller A.I., «A Study of Henry Poincaré's *Sur la Dynamique de l'Electron*», *Archive for History of Exact Science*, Springer-Verlag, vol. 10, no. 3-7, 1973, p. 264. Воспроизводится также в *Frontiers of Physics*, op cit., p. 86.

## Релятивистская динамика Пуанкаре

### Новая кинематика, новая динамика

Краткая заметка и основная статья Пуанкаре о теории относительности включают в неявном виде «Введение», за которым следуют «Кинематическая часть», а затем «Динамическая часть» (такая структура более очевидна в заметке, чем в основной статье).

Слова «*кинематика*», от греческого *kinêma* — движение — относится к изучению движения вне зависимости от вызывающих его причин. Исследование, проведенное Пуанкаре в первой части своей заметки, позволяет разрешить ряд весьма интересных проблем кинематики.

Рассмотрим, например, частицу света, перемещающуюся со скоростью  $c$  в направлении  $x$ . Пусть  $x, t$  есть координаты этой частицы «до преобразования», и  $x', t'$  — «после преобразования».

Если в соответствии с классической кинематикой положить  $x' = x + \varepsilon t, t' = t$ , то при  $x = 1$  получаем  $x' = t'(1 + \varepsilon)$ , а не  $x' = t'$ , как то должно было бы быть, чтобы удовлетворять принципу относительности [напомним, что у Пуанкаре предельная скорость имеет величину  $c = 1$ ].

Положим теперь, в соответствии релятивистскими формулами Пуанкаре,  $x' = x + \varepsilon t, t' = t + \varepsilon x$ . Поскольку  $x = t$ , заменим  $x$  на  $t$  и получим:  $x' = t + \varepsilon t, t' = t + \varepsilon t$ . Итак,  $x' = t'$ , то есть принцип относительности соблюдается.

Отметим, что *a priori* эти преобразования совсем не очевидны, даже если в конце концов они оказываются совсем простыми (как с Колумбовым яйцом, стоило только догадаться)...

Мы видели, как между прочим Пуанкаре установил закон преобразования скорости движущегося электрона. На основе этого чисто кинематического анализа он (в неявном виде) выводит новое правило «сложения скоростей».

Я сижу в поезде, движущемся по прямой со скоростью  $v$  и выбрасываю из окна в направлении движения предмет со скоростью  $u$ . Какова будет скорость этого предмета по отношению к земле? В классической механике эта скорость задается выражением  $w = v + u$ . Поскольку эта формула не годится в новой механике, Пуанкаре выводит новое правило: слагаемое двух параллельных скоростей есть не  $u + v$ , а  $(u + v)/(1 + uv)$  [напомним, что в этом уравнении  $c$  полагается равным единице].

Применим новое правило к проблеме аберрации. Пусть скорость света в стекле есть  $1/n$ . Прибавим эту скорость к скорости поступательного движения Земли  $v$ , что дает:  $w = (1/n + v)/(1 + v/n)$ . Поскольку скорость  $v$  очень мала по сравнению с единицей (которая есть скорость света), то эту формулу можно записать в упрощенном виде  $w = (1/n + v)(1 - v/n)$ . Если пренебречь членом  $v^2/n$  (членом порядка квадрата аберрации), то получим:  $w = 1/n + v(1 - 1/n^2)$ .

Именно это (с учетом  $c = 1$ ) объясняет успех формулы Френеля.<sup>1</sup>

Посмотрим как Пуанкаре использовал свои результаты в основах «новой динамики». Но вначале разберемся, что же, собственно, есть «динамика».

В 1689 г. Лейбниц направляется с дипломатическим поручением в Рим. На обратном пути он останавливается во Флоренции, легендарном городе, где несколькими десятилетиями ранее Галилей сформулировал свои знаме-

нитые «Две новые науки». За несколько дней Лейбниц в свою очередь создает там новую науку, которую он назовет *Dynamica* — он тогда называл ее «мои динамики». «Я часто слышал мнения людей, которые говорили, что в теле можно различить лишь величину, форму и движение [это Декарт!]. Я же отмечал, что в каждый момент в теле существует лишь причина движения, то есть то состояние тела, которое имело бы место, если бы ничто тому не мешало».<sup>2</sup> Он называет такую причину «действием».

Так в физику входит одно из самых замечательных ее открытий — основу его закладывает Пьер Моро де Мопертюи (1698–1759), который в 1744 г. предполагает, что луч света, проходя от одной точки к другой, затрачивает «наименьшее возможное количество действия»; затем в дело вступают Эйлер (1707–1783), Лагранж (1736–1813) и Гамильтон (1805–1865), которые вводят в механику «принцип наименьшего действия», предложенный для лучей света Мопертюи.

## Пуанкаре ссылается на принцип наименьшего действия

В Разделе 2 своей статьи Пуанкаре упоминает о «принципе наименьшего действия». Вот что он говорит: «Известно, как Лоренц вывел свои уравнения из принципа наименьшего действия».

Больше всех этому утверждению должен был поразиться сам Лоренц, который никогда при «выводе» своих уравнений не прибегал к принципу наименьшего действия. В своей большой статье 1904 г., на которую ссылается Пуанкаре, Лоренц в основном обсуждает *электромагнетизм*, а не *электродинамику*, как то следует и из заглавия его статьи: «Электромагнитные явления, происходящие в системе, движущейся со скоростью, меньшей скорости света». В ней ни разу не упоминается даже действие, не говоря уж о принципе наименьшего действия.

Пуанкаре вводит лагранжиан, соответствующий «плотности заряда»  $\rho$ , взаимодействующего с электромагнитным полем. Исходя из двух уравнений Максвелла ( $\operatorname{div}\mathbf{B} = 0$  и  $\operatorname{div}\mathbf{D} = \rho$ ), он получает два других из четырех уравнений Максвелла, как следствие принципа наименьшего действия, и показывает, что электрическая сила Лоренца, записанная в виде  $\rho(\mathbf{E} + \mathbf{v}\mathbf{B})$ , сохраняет форму при применении преобразований Лоренца. То есть, она является *инвариантом*, чего Лоренц не только не обнаружил, но о чем даже и не подозревал.

В следующем разделе Пуанкаре обращается к вопросу о том, является ли принцип наименьшего действия причиной успеха применения преобразований Лоренца.

Пуанкаре смело вторгается в «новую динамику» и превосходит Лоренца (динамика, в которой нет действия, собственно говоря, вообще не может считаться динамикой). Полученный в этом разделе результат имеет фундаментальное значение. Записав действие в виде интеграла, как это обычно и делается, он показывает, что оно есть инвариант, если пределы интегрирования задаются от «минус бесконечности» до «плюс бесконечности», на что ранее никто не обращал внимания.

Пуанкаре остается лишь перейти, на этот раз в рамках новой механики, к тому уравнению, которое он, по сути, уже получил шестью годами раньше:  $E = mc^2$ .

### ...И интересуется массой электрона

Заинтересовавшись происхождением массы электрона, Пуанкаре рассматривает различные выдвинутые по этому поводу гипотезы: «Согласно Абрагаму, электроны должны быть сферическими и недеформируемыми. Однако, после применения преобразования Лоренца к реальному сферическому электрону идеальный электрон должен стать эллипсоидом».

«По гипотезе Лоренца, напротив, деформироваться должны движущиеся электроны, в результате чего реальный электрон становится эллипсоидом, в то время как неподвижный идеальный электрон всегда остается сферой».

Не излагая прямо свои идеи, Пуанкаре тем не менее, рассматривая другие предположения, в частности, наиболее «многообещающее» предложение Лоренца, получает результаты, далеко превосходящие по важности суть рассматриваемой проблемы.

Исходным пунктом его рассуждений является энергия (точнее, энергия электромагнитного поля) — понятие в то время все еще окутанное ореолом тайны. Во время написания той статьи физики полагали (хотя и не понимая, как все это происходит), что распределенная в пространстве энергия содержится в «эфире» в виде двух составляющих — потенциальной энергии  $U$  и кинетической энергии  $T$ .

Рассмотрим все это подробнее.

В наиболее общей форме уравнения преобразований Лоренца в обозначениях Пуанкаре записываются так:  $x' = kl(x + \varepsilon t)$ ,  $y' = ly$ ,  $z' = lz$ ,  $t' = kl(t + \varepsilon x)$ . Памятуя, что электрон и образуемое им поле едины, невозможно установить, что принадлежит полю, а что электрону. Всё, а в особенности энергия, принадлежит обоим.

Пуанкаре рассматривает составляющие энергии в трех пространственных направлениях, которые он называет *продольная электрическая составляющая*, *поперечная электрическая составляющая* и *поперечная магнитная составляющая*. Он обозначает их, соответственно,  $A, B, C$  до преобразования и  $A', B', C'$  после него. Будучи истинным виртуозом преобразований, он сразу находит уравнения, связывающие  $A', B', C'$  с  $A, B, C$ , а именно:  $A' = kA/l$ ,  $B' = B/kl$ ,  $C' = 0$ .<sup>3</sup> Наконец, он обозначает полную энергию как  $E$ , лагранжиан<sup>4</sup> как  $H$  (почему-то он не стал обозначать его привычным  $L$ ), а импульс как  $D$ . Как же связать эти три величины с составляющими энергии?

Полная энергия есть сумма трех составляющих, то есть  $A + B + C$  до преобразования. Она приобретает вид  $A'lk(3 + \varepsilon^2)$  после преобразования, в чем легко убедиться (конечно, если обладать способностями Пуанкаре!).

Перейдем теперь к лагранжиану. В обозначениях Пуанкаре он записывается так:  $A + B - C$ , а закон его преобразования есть  $H' = kH/l$ .

Подозревая наличие некоторых соотношений между энергией, лагранжианом и импульсом, Пуанкаре полагает возможным найти, что  $D = dH/d\varepsilon$  и  $E = H - \varepsilon D$ , однако наталкивается на противоречие. Если «второе из уравнений справедливо всегда, то первое выполняется только при  $kl^3 = 1$ , то есть если объем идеального электрона равен объему реального электрона, или говоря иначе, если объем электрона постоянен».

Этот результат противоречит соотношению  $l = 1$ , поскольку из  $kl^3 = 1$ , следует, что  $k = 1$ , а это справедливо лишь при  $\varepsilon = 0$ . Пуанкаре показывает,

как избежать этого противоречия. Он задерживается на этом моменте потому, что тот позволит ему, как бы между прочим, построить новую, основанную на механике Лагранжа, электродинамику, которую он употребит для критического рассмотрения теорий, предложенных ведущими теоретиками того времени — Абрагамом, Лоренцом и Ланжевеном — и для определения того, которая из них отвечает, по крайней мере, требованиям принципа относительности.

## Что скрывается за символами

Виртуозная статья Пуанкаре изобилует чисто математическими шедеврами, что затрудняет ее понимание, а потому она полностью игнорируется адептами теории относительности. Одной из самых трудных является часть, где Пуанкаре получает выражение для поперечной массы электрона. А ведь именно из этого выражения и можно получить знаменитое соотношение  $E = mc^2$ !

В §8 обсуждаемой статьи говорится: «Вычислим теперь массу электрона, я имею в виду «экспериментальную массу», т.е. массу при малых скоростях — это то, что сейчас называется «собственной» массой электрона. Пуанкаре приходит к следующему результату, в принятых им обозначениях:  $H = (a/b)(1 - v^2/2)$ . Попробуем его расшифровать.

При малых скоростях, говорит Пуанкаре, «как продольная, так и поперечная масса есть  $a/b$ », а потому положим  $m = a/b$  и восстановим в уравнении  $c^2$ .<sup>5</sup> Тогда вместо  $1 - v^2/2$  получим  $c^2 - v^2/2$ . Наконец,  $H$  есть лагранжиан, то есть разница  $U - T$  потенциальной и кинетической энергий. В современных обозначениях это записывается так:  $U - T = m(c^2 - v^2/2) = mc^2 - mv^2/2$ . Но  $mv^2/2$  есть классическое выражение для кинетической энергии. Отсюда  $T = mv^2/2$  и, следовательно,  $U = mc^2$ , то есть при  $v = 0$  полная энергия задается выражением  $E = mc^2$ .

Таким релятивистским рассуждением Пуанкаре вновь приходит к фундаментальному результату, полученному им в 1900 г. при помощи теоремы Пойнтинга (см. с. 40). Отсюда следует, что даже в покое, вне зависимости от кинетической энергии его движения, электрон обладает «запасом» потенциальной энергии, равным  $mc^2$ . Именно в таком глубоком смысле следует понимать формулу  $E = mc^2$ .

Сам Пуанкаре не записал уравнение в таком виде.<sup>6</sup> Но мы знаем, что ему было свойственно идти вперед не оглядываясь, не приводя каждый раз разъяснений, а иногда и не понимая значения своих открытий. Он торопился — у него было столько идей и так мало времени. . .

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Пуанкаре не привел этот результат в своей статье. Впервые это сделал через год, в 1907 г. Макс фон Лауэ. Он отметил, что в опыте с телескопом, заполненным водой, все происходит так, как если бы «свет полностью увлекался водой», так что правило сложения скоростей в точности компенсировало этот эффект. Max von Laue, *Annalen der Physik*, vol. 23, 1907, p. 989.

<sup>2</sup>Письмо Лейбница, адресованное главе школы Арно в Пор-Руайяль в 1693 г.



<sup>3</sup>Не следует удивляться тому, что  $C' = 0$ .  $C$  представляет собой энергию магнитной составляющей поля в предполагаемом направлении поступательного движения. Для неподвижного электрона эта энергия равна нулю — это случай идеального электрона Лоренца.

<sup>4</sup>Некоторые авторы предпочитают определять лагранжиан как  $T - U$ , а не  $U - T$ , как то сделал в данном случае Пуанкаре.

<sup>5</sup>Это стандартный прием в анализе размерностей.

<sup>6</sup>У этого вывода было занятое продолжение. Если проделать этот вывод в рамках теории Лоренца, то получаемая масса на три четверти больше той, что у Пуанкаре. Это неудивительно, поскольку теория Лоренца неверна. После смерти Пуанкаре физики пытались понять, откуда берутся эти три четверти в формуле Лоренца (см. например, Enrico Fermi, *Corrisione di una grave discrepanza tra la teoria delle masse elettromagnetische e la teoria della relativita*, Rendiconti dei Lincei, vol. 31, 1922, p. 184–187 и 306–309). Эйнштейн тоже задавался этим вопросом. Он полагал, что три четверти массы электрона имеют электромагнитное происхождение, а за одну четверть отвечало действие поля тяготения — из такого подхода ничего не вышло (Эйнштейн, 1919).

# Эйнштейн принимается за работу

Да здравствует напор!  
Это мой ангел-хранитель.

*Альберт Эйнштейн в письме невесте*

## В поисках истинных идей

### Последователь Спинозы

И Эйнштейном, и Пуанкаре владела одна и та же страсть — поиск «истинных идей», но с одним различием. Когда Пуанкаре наталкивался на истинную идею, он делал ее отправным пунктом своих размышлений, стараясь увидеть, к чему она в конце концов приведет. Эйнштейн же принимал такую идею за конечный результат и стремился обосновать ее, исходя из принципов натурфилософии.

Как мы видели, в молодости он хотел стать преподавателем философии, но этим планам положил конец отец, вынудивший его обучаться инженерной специальности (см. с. 47). Но молодой человек сохранил привязанность к философии и основал в Берне *Академию Олимпия*, чтобы без помех изучать труды великих философов — Юма, Спинозы, Канта, Маха и... Пуанкаре.

Мы еще увидим, какое влияние оказал на него Пуанкаре, но сначала обратимся к Спинозе.

Два фундаментальных понятия философии Спинозы оказали особое влияние на Эйнштейна. В отличие от Декарта, Спиноза считал человеческую душу не субстанцией, обладающей бесконечной свободой воли и не подчиненной чисто механистическому материальному миру, а «подобной машине, состоящей из отдельных частей, объединенных их причинными соотношениями», некой реальностью, подчиненной внутренним заданным законам (хотя и подчеркивал, что ее части «состоят не из материи, а из духа»). Эйнштейн однажды написал: «Я не думаю, что мы обладаем свободой воли», с чем был вполне согласен его друг Мишель Бессо: «Я не верю в свободу принятия решений, которая, согласно Спинозе, есть лишь иллюзия».<sup>1</sup>

А вот положение второй доктрины Спинозы, которая оказала решающее влияние на Эйнштейна: «То что мы можем, то что в наших силах —

это сконцентрироваться на нескольких истинных идеях, приложить усилия к тому, чтобы четко отделить их от других, найти их *структуру*, вычленив их *модель, способ осуществления*, установить их *мощь и абсолютную строгость*». Я выделил в этом тексте те понятия, которые позволяют лучше различить контуры эйнштейновского подхода. Его подход к физике прежде всего состоял в том, чтобы найти «истинные идеи», четко отделяя их от других, и установить их *мощь и абсолютную строгость*.

Но где найти «истинные идеи»? В собственных размышлениях? Возможно, но до сих пор Эйнштейна преследовали лишь неудачи.<sup>2</sup>

В письме, написанном много лет спустя его *alter ego* Мишелем Бессо, читаем: «Это просто сказка, как тебе удалось разбудить [в 1905 г.] несколько «спящих красавиц»». <sup>3</sup> И в самом деле, если приглядеться, то в каждой из четырех опубликованных в 1905 г. Эйнштейном статей имеется уравнение, уже обнаруженное ранее кем-то другим, но «преданное забвению».<sup>4</sup>

## Да здравствует напор!

А что же делает в Берне Эйнштейн, пока Пуанкаре где-то в Атлантике создает теорию относительности? По словам его биографа Дениса Брайана, «рождение второго сына не помешало ему продолжать свои исследования. Эксперт третьего класса стоит на пороге открытий, которые вознесут его на уровень самых выдающихся мыслителей всех времен»<sup>5</sup>. В том году Эйнштейн находится в самом творческом состоянии духа, которое только подстегивается необходимостью ежедневно рассматривать заявки на патенты и беседами со своим другом, которого он позже назвал «бабочкой». Этот 1905 год стал тем годом, когда он начал осуществлять свой план, объявленный четырьмя годами ранее своей будущей жене: «Да здравствует напор! Он мой ангел-хранитель»<sup>6</sup>. Отныне, предохраняемый от материальных забот своей должностью в патентном бюро, он готов бросить вызов миру. Но пока единственным способом бросить вызов миру... для него остается подготовка своих обзоров.

Для начала он готовит восемь отчетов для *Beblätter*, третий из которых о статье английского физика МакФаддена Орра, сурово критикующего основы и выводы труда Макса Планка *Vorlesungen über Thermodynamik*<sup>7</sup>, что не могло не понравиться Эйнштейну, который и сам готовился напасть на Планка, хотя и с другого угла.

В первых числах марта, после полугода отсутствия, в Берне неожиданно объявился Морис Соловин, и Эйнштейн тут же пишет Конраду Габихту, не без юмора и весьма настойчиво: «Это есть “приказ” присутствовать на нескольких заседаниях нашей заслуженной Академии и тем увеличить число ее членов на 50 процентов».<sup>8</sup> Занятый подготовкой своей диссертации, которую он представит в июле, Габихт не отвечает. Тогда Эйнштейн решает с помощью Соловина и Бессо бросить вызов миру, послав для публикации сразу четыре статьи... на четыре разные темы. По крайней мере одна из них — только неясно какая — к чему-то да приведет.

Первая готова 15 марта. Она приводит Мишеля Бессо в ужас: он предупреждает друга, что в том виде, как она написана, статья может оскорбить Макса Планка, а не будем забывать, что тот был редактором *Annalen der Physik*. Эйнштейн несколько смягчает тон, но по сути оставляет всю критику нетронутой, и посылает статью в *Annalen* 17 марта.<sup>9</sup>

Вторая статья готова в апреле. Эйнштейн делит ее надвое — одну часть он оставляет себе, чтобы сделать из нее диссертацию, а вторую отправляет в *Annalen* 11 мая.<sup>10</sup>

Он снова пишет Габихту: «Завеса молчания разделила нас. [...] Ты мне так и не отправил текст своей диссертации. А ведь я один из тех, кто прочитал бы ее со вниманием и удовольствием, дурачок ты эдакий! Я же обещаю послать тебе в обмен четыре статьи, одну из них отправлю прямо на днях, как только получу гранки [...]».<sup>11</sup>

Четвертая статья пока существует лишь в набросках, но время терпит.

## Эйнштейн пишет прославившую его статью

Уже начало июня, а Эйнштейн все не представил свою диссертацию в Цюрихский университет. Что же его задерживает? Как утверждают его биографы, у него в голове совсем другое: «Приятным весенним днем 1905 г. он признается своему другу Бессо, что ему не хватает всего чуть-чуть чтобы разгадать эпохальную загадку. Чтобы ее решить, ему нужно опробовать свои мысли на Бессо. Им нужно биться над ней вместе, дуэтом».<sup>12</sup> Друзья пускаются на поиски недостающих частей головоломки... «Но оказывается, что одного дня самых активных обсуждений недостаточно для решения загадки, преследовавшей Эйнштейна с юности». Обескураженный возвращается он домой «убежденный, что никогда не сможет познать истинные законы природы [...], основанные на очевидных фактах». Наутро он просыпается «очень возбужденным, как если бы, по его словам, «гроза омыла его мозг»: [...] он наконец проник в «божественные помыслы» и в замысел построения Вселенной». Банеш Хоффман, принстонский сотрудник Эйнштейна в 1935–1937 гг., рассказывал: «Эйнштейн говорил, что свое основное открытие он сделал однажды утром, проснувшись и буквально «увидев» сразу все решение целиком».<sup>13</sup>

На самом деле, все было не так драматично.

В начале июня в Берн попадает экземпляр Докладов Парижской академии наук со статьей Пуанкаре от 5 июня. Покончив с колебаниями, Эйнштейн немедленно принимается за окончательную доработку четвертой начатой весной статьи. Трудясь допоздна, он заканчивает ее в конце июня и отправляет в *Annalen*, куда она поступает 30 июня. Сразу после этого, он уступает уговорам жены и берет несколько дней отпуска, чтобы отправиться к ее родителям в Нови Сад с их годовалым вторым сыном.

В начале июля в Лейпциге, профессор Вильгельм Рентген, первый лауреат Нобелевской премии по физике за 1901 г. и член редколлегии *Annalen*, поручает своему молодому русскому ассистенту, будущему члену Академии Наук СССР Абраму Иоффе, ознакомиться со статьей (А. Иоффе, в своих *Воспоминаниях об Альберте Эйнштейне* упоминает, что оригинал статьи,

позже уничтоженный, был подписан «Эйнштейн-Марич»).\* Иоффе прочитывает статью, отмечает, что она посвящена актуальной теме — электродинамике (статья называлась *К электродинамике движущихся тел*), что ее автор известен редакторам *Annalen* и рекомендует ее к публикации.<sup>14</sup>

Биографии можно писать по-разному. Можно в основном обращать внимание на подробности личной жизни, что в большинстве своем и делали биографы Эйнштейна, а можно пытаться найти «решающие» моменты жизни. Таким решающим моментом в жизни Эйнштейна, который затем создал ему репутацию и славу, был момент, когда ему в голову пришла «истинная идея, изменившая весь ход его жизни». Откуда? Когда? Как это случилось? Рассмотрим все это подробнее.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Speziali P., *Albert Einstein, correspondance avec Michele Besso*, op. cit., p. xxxvii.

<sup>2</sup>В 1900 г. Эйнштейну показалось, что он открыл закон, связывающий атомы в молекулах, но он тут же обнаружил, что его теория молекулярных сил неверна, и ему пришлось срочно забирать из Цюрихского университета свою диссертацию, посвященную этой проблеме.

<sup>3</sup>Письмо М. Бессо Эйнштейну, *The Collected papers*, op. cit., документ 132, p. 199).

<sup>4</sup>*Ibid.*

<sup>5</sup>Brian D., *Einstein: A life*.

<sup>6</sup>Письмо Эйнштейна Милеве Марич, no. 45, *Lettres d'amour et de science*, op.cit. Отвращенный в 1901 г. проф. Друде, у которого он хотел получить место ассистента, Эйнштейн поклялся: «Больше я не буду обращаться к этому типу, я буду безжалостно нападать на него, как он того заслуживает, в своих обзорах». Вскоре он направил план своей диссертации профессору Цюрихского университета Кляйнеру и заявил: «Если он осмелится отвергнуть мою диссертацию, я опубликую все черным по белому и он станет всеобщим посмешищем! Если же он ее примет, посмотрим, что о ней скажет наш уважаемый Друде. . . Какие же они оба подонки!» Кляйнер принял диссертацию, и Эйнштейну, несмотря на гнев, пришлось отказаться от своих замыслов. (*Lettres* no. 38, 45, 46).

<sup>7</sup>Orr W.M., *Philosophical Magazine*, s. , 1904, p. 509.

<sup>8</sup>Письмо Эйнштейна Конраду Габихту, 6 марта 1905 г., *The Collected Papers*, op.cit., vol. V, doc. 26.

<sup>9</sup>Einstein A., *Annalen der Physik*, op. cit., vol. 17, 1905, p. 132. Вскоре после публикации этой статьи Эйнштейн подготовил обзор работы Планка, озаглавленной «Уроки теплового излучения», где он подчеркивает «замечательную ясность и целостность изложения», хотя и упрекает Планка за то, что тот достигает цели «лишь прибегнув к гипотезе, сформулированной по аналогии». *Beiblätter*, vol. 30, 1906, p. 764.

<sup>10</sup>Einstein A., *Annalen der Physik*, op. cit., vol. 17, 1905, p. 549.

<sup>11</sup>Письмо Эйнштейна Конраду Габихту, 18 или 25 мая 1905 г., *The Collected Papers*, op.cit., vol. V, doc. 27.

<sup>12</sup>Brian D., *Einstein: A life*.

\* Автор не вполне точен. А.Ф. Иоффе написал об этом в статье «Памяти Альберта Эйнштейна», опубликованной в журнале «Успехи физических наук», том LVII, выпуск 2, октябрь 1955 г.: «В 1905 г. в “Анналах физики” появилось три статьи, положившие начало трём наиболее актуальным направлениям физики XX века. Это были: теория броуновского движения, фотонная теория света и теория относительности. Автор их — неизвестный до тех пор чиновник патентного бюро в Берне Эйнштейн-Маричи (Маричи — фамилия его жены, которая по швейцарскому обычаю прибавляется к фамилии мужа). Орфография автора сохранена. Как видно из приведенной выше цитаты, А.Ф. Иоффе упоминает не одну лишь работу по электродинамике (теории относительности), а все три основополагающие работы Эйнштейна, причем ни слова не говорит о своем участии в решении об их публикации. Кроме того, он прямо говорит, что автор статей был никому неизвестен. — (прим. перев.)

<sup>13</sup>Brian пишет: «Откровение того утра было откровением самого секрета творения. [...] Встретив тем же днем Бессо, Эйнштейн ограничился таким приветствием: «Спасибо. Я полностью решил проблему». Примечательно, что в окончательном варианте статьи нет ни сносок, ни ссылок на литературу, как если бы вдохновение снизошло на него если не от Бога, то по крайней мере от какого-то источника не от мира сего». По мнению Банеша Хоффмана, «окончательная формулировка вызрела в голове Эйнштейна после многих лет размышлений».

В интервью профессору физики технологического института Кейза Кливленда Роберту Шенкланду в 1950 г., Эйнштейн лишь указал, что «часто решения приходят весьма косвенными путями». "Conversations with Albert Einstein *American Journal of Physics*, vol. 31, 1963, p. 37–47. УФН, том 47, вып. 4, с. 711, декабрь 1965 г.

<sup>14</sup>В 1943 г. библиотекарь Принстонского университета попросил у Эйнштейна оригинал этой статьи для Комитета писателей по сбору средств на военные нужды. Эйнштейн ответил, что он выбросил рукопись и этой статьи и диссертации, но согласился ее восстановить. Его секретарь Элен Дюкас вслух диктовала текст, который Эйнштейн переписывал от руки. Элен Дюкас рассказывала, что Эйнштейн прерывал диктовку после почти каждой фразы и спрашивал: «Это я так сказал?». Получив утвердительный ответ, он качал головой: «Я мог сказать это проще». Рукопись была приобретена с аукциона в Канзас-сити 3 февраля 1943 г. Городской страховой компанией Канзаса за шесть миллионов долларов — большие деньги по тем временам. Сейчас она находится в Библиотеке Конгресса в Вашингтоне. F.E. Brasch, *Library of Congress Quarterly*, vol. 2(4), 1945, p. 39.

## «Последователь» Пуанкаре

### Как обстояло дело

К 30 июня 1905 года, к моменту получения редакцией журнала *Annalen der Physik* статьи Эйнштейна «*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*»<sup>\*</sup> дело обстояло следующим образом:

1. Шестью годами ранее Пуанкаре установил соотношение  $E = mc^2$ ;
2. Он заявил об открытии «общего закона природы», названного им *принципом относительности*;
3. Он сформулировал принцип, согласно которому скорость света в пустоте является «непреодолимым пределом», что позволило положить  $c = 1$  в уравнениях электродинамики;
4. Он вывел уравнения преобразований, названных им *преобразованиями Лоренца*, которые оставляют инвариантными уравнения электромагнетизма;
5. Он обнаружил группу преобразований, названную им *группой Лоренца*, и определил ее инварианты;
6. Он открыл «пространство четырех измерений», будущее «пространство–время», которое должно было служить основой его «Новой механики», родившейся в ходе его новаторских работ;
7. Он представил в Парижскую академию наук записку с изложением результатов своей работы.

Одним словом, была создана так называемая «частная», или специальная теория относительности, а электродинамика движущихся тел была доведена до полного совершенства. Что еще оставалось сделать?

### В дело вступает Мишель Бессо

Мишель Бессо, этот неутомимый читатель, беспрестанно заполнял массу записных книжек своими заметками, а то и просто делал их на полях книг. Его биограф сообщает, что после Бессо остались «тысячи книг, по большей части аннотированных, тысячи писем, сотни записных книжек на самые разные темы...»<sup>1</sup> Неудивительно поэтому, что Бессо стал неиссякаемым источником «истинных идей», почерпнутых им у великих авторов замечательных книг.

В конце своей статьи о теории относительности Эйнштейн написал: «В заключение отмечу, что мой друг и коллега М. Бессо явился верным помощником при разработке изложенных здесь проблем и что я обязан ему за ряд ценных указаний».

И в самом деле, результаты сотрудничества двух друзей видны в каждой строчке статьи 1905 года. Вот чем объясняется тот факт, что эта безупречно написанная работа тем не менее не лишена логических несоответствий.

---

<sup>\*</sup> К электродинамике движущихся тел.

## В отраженном свете Пуанкаре

Статья «К электродинамике движущихся тел»<sup>\*</sup> состоит из короткого введения и двух частей — «Кинематической части» и «Электродинамической части». Особый интерес представляет состоящее из четырех параграфов введение, где Эйнштейн задает тон всей работе. Внимательно проштудировав Пуанкаре, он излагает там три «истинные идеи», почерпнутые им у Пуанкаре (причем, по крайней мере, первую из них при помощи Мишеля Бессо). «Известно, — пишет он, — что электродинамика Максвелла в современном ее виде приводит в применении к движущимся телам к асимметрии, которая несвойственна, по-видимому, самим явлениям». В качестве примера такой асимметрии он приводит магнит и проводник с током. Рассмотрение этого примера привело в конце XIX века к бурным спорам и разделило их участников на два враждующих лагеря. Эти споры продолжались до тех пор, пока в апреле 1900 года не было найдено окончательное решение. И найдено оно было никем иным, как Анри Пуанкаре в его работе «Электрическое освещение».

Зачем же Эйнштейну понадобилось вспоминать и помещать в начале своей статьи эту уже разрешенную проблему? А затем, что он хочет воспользоваться «истинной идеей», предложенной Пуанкаре для решения проблемы. . . Чуть ниже Эйнштейн говорит: «Ясно, что асимметрия, упомянутая во введении при рассмотрении токов, возникающих вследствие относительного движения магнита и проводника, исчезает». И далее делает вывод: «Вопросы о том, где “сидят” электродинамические силы (униполярные машины), также теряют смысл».

Второй из четырех параграфов введения к знаменитой статье содержит две фразы, первая из которых гласит: «Примеры подобного рода, как и неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно “светоносной среды”, ведут к предположению, что не только в механике, но и в электродинамике никакие свойства явлений не соответствуют понятию абсолютного покоя».

Здесь Эйнштейн излагает в чуть видоизмененном виде «общий закон природы», предложенный Пуанкаре годом ранее. Однако он проявляет завидную сдержанность: он не говорит «эфир», он говорит «светоносная среда»; он не говорит «как то показал Пуанкаре», а говорит «ведут к предположению» и т.п.

Во втором предложении Эйнштейн пишет: «Это предположение мы намерены возвести в ранг гипотезы».<sup>†</sup> Прекрасный знаток книги *Наука и гипотеза* Эйнштейн отлично знает, какое значение придает Пуанкаре ясному изложению гипотез, на основе которых физики строят свои теории. В главе XIII этой книги Пуанкаре, например, замечает: «Ампер назвал свой бессмертный труд “Теория электродинамических явлений, основанная исключительно на опыте”. Он полагал, что не вводил *никаких* гипотез, но

<sup>\*</sup> В дальнейшем автор ссылается на французский перевод статьи, сделанный другом Эйнштейна Морисом Соловином, которого он называет официальным переводчиком Эйнштейна. — (прим. перев.)

<sup>†</sup> Так эта фраза приводится в авторском тексте. Читателю следует иметь в виду, что в немецком оригинале использовано слово *Voraussetzung* — “предпосылка, допущение”, а не «гипотеза». В русском переводе эта фраза звучит так: «Это предположение мы намерены превратить в предпосылку». Все последующие рассуждения автора основываются именно на использовании слова “гипотеза”, а не “предпосылка” или “допущение”, по-видимому, в результате неточного перевода на французский. — (прим. перев.)



это конечно же не так. Он вводил их, не сознавая того». <sup>2</sup> Предлагая «возвести» *предположение* Пуанкаре в ранг *гипотезы* (возможно, по предложению Бессо, мастера на такие штуки), Эйнштейн укреплял свои тылы.\*

Остается дать имя этому предположению, которое стало гипотезой. В своей заметке в Парижскую академию Пуанкаре указал в скобках наименование, которое он хотел бы дать выведенным им преобразованиям: «(которые я предлагаю назвать именем *Лоренца*)». Эйнштейн тоже приводит в скобках наименование, которое он дает своему предположению: «(содержание которого в дальнейшем будет называться “принципом относительности”)».

Превратив принцип относительности в «гипотезу», Эйнштейн формулирует второй постулат, который он сначала называет «допущением»: «свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью  $c$ , не зависящей от состояния движения излучающего тела». Это есть гипотеза « $c = 1$ » новой механики Пуанкаре.

Я преднамеренно оставил пока в стороне часть всей фразы Эйнштейна — «... [добавочное допущение], находящееся с первым лишь в кажущемся противоречии...», но лишь для того, чтобы подчеркнуть далее его значение. Чуть ниже Эйнштейн пишет: «... мы еще не доказали, что принцип постоянства скорости света совместим с принципом относительности». Очевидно, дать такое доказательство — весьма важная для него задача.

## Фальшивая нота

Пока что Эйнштейн, с помощью Бессо, воспользовался двумя фундаментальными постулатами, на которых зиждется новая механика Пуанкаре: принципом относительности и принципом постоянства скорости света. Он заверяет читателя в том, что «эти две предпосылки достаточны для того, чтобы, положив в основу теорию Максвелла для покоящихся тел, построить простую, свободную от противоречий электродинамику движущихся тел».

В конце введения Эйнштейн вводит третье «предположение», хотя прямо он так его не называет: «Развиваемая теория основывается, *как и всякая другая электродинамика*, на кинематике твердого тела...» [выделено мной].

Упомянутая здесь «кинематика твердого тела» восходит к трудам Эрнста Маха, с которыми Бессо познакомил Эйнштейна несколькими годами раньше. В итоге, Мах стал для членов *Академии Олимпия* одним из любимых авторов. Вот что подчеркивал Бессо в своем письме Эйнштейну в 1947 г.: «Учение Маха самым непосредственным образом связано с *наблюдаемыми* явлениями, а возможно, косвенно, и с часами, и линейками». <sup>3</sup> Эйнштейн в заключение своего введения написал так: «Недостаточное понимание этого обстоятельства является корнем тех трудностей, преодолеть которые приходится теперь электродинамике движущихся тел».

Мы скоро увидим, что это введенное исподтишка третье «предположение» оказало Эйнштейну медвежью услугу — анализируя (гораздо позже) его следствия, он был вынужден признать, что оно «несовместимо» с двумя другими постулатами.

---

\* И здесь читателю следует иметь в виду, что ни в русском переводе, ни в немецком оригинале не говорится о «возведении предположения в ранг гипотезы» — (прим. перев.)

## А как быть с эфиром?

Хотелось бы обратить внимание еще на одну фразу из статьи Эйнштейна: «Введение “светоносного эфира” окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится “абсолютно покоящееся пространство”, наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в котором протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-нибудь вектор скорости».

Он также заверяет читателя в том, что «положив в основу теорию Максвелла», можно с помощью указанных двух предположений построить электродинамику движущихся тел «простую и свободную от противоречий».

В курсе лекций по электричеству и оптике, прочитанному в Сорбонне в 1888 г., Пуанкаре отмечал: «Важной характеристикой теории Максвелла является та особая роль, которая отводится диэлектрикам [телам, не проводящим электричество]. Максвелл полагает, что все вещество диэлектриков заполнено гипотетической упругой жидкостью, аналогом которой в оптике является *эфир*, заполняющий прозрачные тела. Он называет такую жидкость *электричеством*».<sup>4</sup>

Предлагая «положить в основу теорию Максвелла», Эйнштейн конечно же не собирался признавать существование «гипотетической упругой жидкости», которую Максвелл называл «электричеством». Но как бы она ни называлась, эта «жидкость» была существенным элементом «теории Максвелла», которую Эйнштейн собирался «положить в основу». «Устранение» им эфира является поэтому лишь словесной уловкой.

В заключение этого краткого анализа введения к статье «К электродинамике движущихся тел» вернемся снова к фразе «Недостаточное понимание этого обстоятельства является корнем тех трудностей, преодолевать которые приходится теперь электродинамике движущихся тел». Она отражает глубокое внутреннее убеждение Эйнштейна-философа — он считал, что нашел «истинную идею», способную привести в порядок «электродинамику движущихся тел». Оставалось лишь воплотить ее на деле, к чему он и переходит с первых же слов кинематической части своей статьи.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Speziali P., *Albert Einstein, correspondance avec Michel Besso*, op. cit. p. xii.

<sup>2</sup>Poincaré H., *La Science et l'Hypothèse*, op. cit. p. 227.

<sup>3</sup>Speziali P., *Albert Einstein, correspondance avec Michel Besso*, op. cit. p. 228.

<sup>4</sup>Poincaré H., *Electricité et Optique*, op. cit., chap. II, §17, p. 14.

## Относительность есть «оптическая иллюзия»!

### Последователь Ньютона

После переезда в 1914 г. в Берлин Эйнштейн повесил в своем кабинете на Хаберландштрассе гравюру с портретом человека, перед которым безоговорочно преклонялся — Ньютона.<sup>1</sup> Эйнштейн полностью разделял убеждения Ньютона и резюмировал их так: «Творец изощрен, но не злонамерен». Когда позднее его попросили разъяснить это высказывание, Эйнштейн ответил: «Природа возвышенна, а потому оберегает свои секреты, не прибегая к уловкам».<sup>2</sup>

Фундамент подхода Эйнштейна очень ясно проявляется уже с первых слов «Кинематической части» статьи 1905 г., которую его биографы, как правило, считают крупнейшим вкладом в построение теории относительности. Эйнштейн пишет: «Пусть имеется координатная система, в которой справедливы уравнения механики Ньютона. Для отличия от вводимых позже координатных систем и для уточнения терминологии назовем эту координатную систему “покоящейся системой”». Покоящейся по отношению к чему? Он не поясняет, но это можно обнаружить ниже: «Если некоторая материальная точка находится в покое относительно этой координатной системы, то ее положение относительно последней может быть определено методами евклидовой геометрии с помощью твердых масштабов и выражено в декартовых координатах».

Как мы потом увидим, Эйнштейн откажется от постулата существования в природе «твердых масштабов» вскоре после его введения. Но он постулировал кое что еще — наличие «синхронизированных часов».

Вот что он пишет в третьем параграфе: «Желая описать *движение* какой-нибудь материальной точки, мы задаем значения ее координат как функций времени». Однако, замечает он «... подобное математическое описание имеет физический смысл только тогда, когда предварительно выяснено, что подразумевается здесь под “временем”».

Известный афоризм утверждает, что интеллект — это, что измеряется соответствующим тестом. В том же духе Эйнштейн полагает, что время — это то, что измеряют часы. Однако, требуется еще, чтобы этим определением можно было пользоваться, получить синхронизированные часы — то есть, чтобы «в состоянии покоя» они все измеряли «одно и то же время».

### Одновременность по Эйнштейну

Для измерения времени Эйнштейн изобретает собственное «правило»: «Если в точке  $A$  помещены часы, то наблюдатель, находящийся в  $A$ , может устанавливать время событий в непосредственной близости от  $A$  путем наблюдения одновременных с этими событиями положений стрелок часов». И далее: «Если в другой точке  $B$  пространства также имеются часы [...], то в непосредственной близости от  $B$  тоже возможна временная оценка событий, находящимся в  $B$  наблюдателем». Затем он замечает: «... мы определили пока только “ $A$ -время” и “ $B$ -время”, но не общее для  $A$  и  $B$  “время”». Чтобы выйти из этого затруднения, он предлагает следующее «правило»: «Последнее можно установить, *вводя определение*, что “время”, необходимое для

прохождения света из  $A$  в  $B$ , равно “времени”, требуемому для прохождения света из  $B$  в  $A$ ».

Вот здесь и «зарыта собака». В своем исследовании одновременности двух событий в разных точках пространства, опубликованном в 1898 г., Пуанкаре указал на фундаментальные трудности такого рассмотрения.<sup>3</sup>

«Представим себе, — пишет Пуанкаре, — двух наблюдателей, желающих сверить свои часы при помощи оптических сигналов. Они обмениваются такими сигналами, но поскольку знают, что их передача происходит не мгновенно, то учитывают это обстоятельство. При получении наблюдателем  $B$  сигнала от наблюдателя  $A$  его часы не должны показывать то же время, что у наблюдателя  $A$  в момент передачи сигнала, а должны указывать более позднее время с учетом поправки на время передачи сигнала». И далее: «Предположим, что наблюдатель  $A$  отправляет свой сигнал, когда его часы показывают ноль часов, ноль минут, а наблюдатель  $B$  получает этот сигнал, когда его часы показывают время  $t$ . Часы будут синхронизированы, если задержка, равная  $t$ , есть длительность передачи. Для проверки этого наблюдатель  $B$  в свою очередь посылает сигнал, когда его часы показывают ноль часов, ноль минут, и наблюдатель  $A$  должен получить его, когда его часы будут показывать время  $t$ . В таком случае часы синхронизированы».

Но и это еще не все, потому что «... наблюдатели зафиксируют одно и то же время в один и тот же физический момент при условии, что оба наблюдателя неподвижны. В противном случае длительность передачи сигнала не будет одинаковой в обоих направлениях, так как, например, наблюдатель  $A$  может удаляться от наблюдателя  $B$  или наоборот». Отсюда он делает вывод: «Синхронизированные таким образом часы не будут показывать истинное время, они будут показывать то, что можно назвать местным временем, одно из которых будет отставать от другого». Но имеет ли это значение? «Нет, поскольку у нас нет никакого способа узнать об этом. Все явления для наблюдателя  $A$ , например, будут происходить с задержкой, но задержка всегда будет одинаковой и этот наблюдатель никогда не обнаружит, что его часы отстают». Отсюда Пуанкаре делает общий вывод: «Таким образом, как то и следует из принципа относительности, нет никакого способа узнать, находится ли наблюдатель в абсолютном покое или в абсолютном движении».

Возможность точной синхронизации часов при помощи световых сигналов есть еще одна гипотеза, которую Эйнштейн не формулирует в явном виде как «постулат» или «предположение», но эта возможность лежит в самой основе предлагаемой им теории. Правда, он осмотрительно указывает: «Мы сделаем допущение, что это определение синхронности можно дать непротиворечивым образом и притом для сколь угодно многих точек и что, таким образом, справедливы следующие утверждения: 1) если часы в  $B$  идут синхронно с часами в  $A$ , то часы в  $A$  идут синхронно с часами в  $B$ ; 2) если часы в  $A$  идут синхронно как с часами в  $B$ , так и с часами в  $C$ , то часы в  $B$  и  $C$  также идут синхронно относительно друг друга».

Но как указал Пуанкаре, именно это и невозможно обеспечить, а значит и проверить.

## Эйнштейн выводит формулу для местного времени

Эйнштейн рассматривает систему, «находящуюся в покое», и систему, «движущуюся» в направлении «оси  $x$ » с постоянной скоростью  $v$  по отношению к первой. Вдоль всей «оси  $x$ » в покоящейся системе он помещает рядышком синхронизированные часы. Согласно его критериям, все эти часы показывают одно и то же время в один и тот же физический момент. Это то время, которое Лоренц назвал «истинным временем». Эйнштейн называет его «временем покоящейся системы» и обозначает его символом  $t$ : «... через  $t$  всегда будет обозначаться время покоящейся системы».

Затем он мысленно помещает в движущуюся систему источник, способный по команде посылать «луч света» в направлении оси  $x$ , и зеркало, отражающее этот луч обратно к источнику. Затем он ставит одного «наблюдателя» с синхронизированными часами около источника света, а другого наблюдателя, также с синхронизированными часами, около зеркала. В тот момент, когда его часы показывают время  $t_0$ , находящийся около источника наблюдатель посылает луч света и смотрит на часы в покоящейся системе отсчета. Они показывают  $t_0$ . Луч достигает зеркала в момент  $t_1$  по часам, расположенным рядом с зеркалом, и в момент  $t_1$ , по часам покоящейся системы, находящимися у зеркала. Отразившись от зеркала, луч возвращается к источнику в момент  $t_2$  по часам, расположенным около источника света, и в момент  $t_1$  по часам покоящейся системы, расположенным в том месте, где сейчас находится источник. Расстояние между источником света и зеркалом в движущейся системе остается неизменным в ходе этого эксперимента. Эйнштейн полагает, что расстояние между источником и зеркалом, и зеркалом и источником строго одинаково и записывает:  $t_1 = (1/2)(t_2 - t_0)$ .

Именно здесь проявляется фундаментальная разница в подходах Эйнштейна и Пуанкаре. У Пуанкаре, как мы видели, при движении «вперед» зеркало «убегает» от светового сигнала, а при движении «назад» источник света «отстает». Это означает, что соотношение  $t_1 = (1/2)(t_2 - t_0)$  не выполняется строго. Эйнштейн же напротив постулирует, что оно выполняется со всей строгостью. Согласно ему, различие между длительностью движения в том же и в противоположном направлениях проявляется только тогда, когда длительность определяется при помощи часов в покоящейся системе.\*

С точки зрения покоящейся системы движущаяся система перемещается со скоростью  $v$  по оси  $x$ . Покинув источник в момент  $t_0$ , луч света достигает зеркала в момент  $t_1$ , то есть лучу потребовалось время  $t_1 - t_0$ , чтобы пройти путь «вперед» согласно показанию часов в покоящейся системе. Тем временем движущаяся система, а значит и зеркало, удалились на расстояние  $v(t_1 - t_0)$ . Эйнштейн обозначает через  $x_0$  точку, в которой находилось зеркало на оси  $x$  в момент  $t_0$ . Полное расстояние, которое прошел луч при движении «вперед», есть тогда  $x_0 + v(t_1 - t_0)$ . Луч проходит это расстояние со скоростью света  $c$ , а посему получаем:  $x_0 + v(t_1 - t_0) = c(t_1 - t_0)$ , откуда легко получаем:  $t_1 = t_0 + x_0/(c - v)$ .

---

\* Это замечание автора вызывает вопросы, ведь он сам говорит, что Пуанкаре рассматривает движущееся зеркало, тогда как Эйнштейн говорит о зеркале, не перемещающемся относительно источника света. — (прим. перев.)

Во время движения «назад» движущаяся система продолжает перемещаться вперед со скоростью  $v$ , то есть источник приближается к распространяющемуся лучу. Применяя ту же процедуру, что и для движения «назад», получаем:  $t_2 = t_0 + x_0/(c - v) + x_0/(c + v)$ .

Полученные показания часов  $t_0, t_1, t_2$  соответствуют показаниям  $\tau_0, \tau_1, \tau_2$  часов движущейся системы, поскольку они соответствуют тем же «событиям», а именно испусканию луча, его отражению и возврату к источнику. Эйнштейн потому полагает:

$$\begin{aligned}\tau_0 &= t_0 \\ \tau_1 &= t_0 + x_0/(c - v) \\ \tau_2 &= t_0 + x_0/(c - v) + x_0/(c + v)\end{aligned}$$

Из этих соотношений следует, что  $\tau$ , измеряющее собственное «местное время» в движущейся системе, есть функция  $t$ , то есть «времени покоя», или, по Лоренцу, «истинного» времени. Остается найти вид этой функции.

### Шляпа фокусника

В самом начале Эйнштейн задал *по определению* (он сам так выразился), что в общем случае «... «время», необходимое для прохождения света из  $A$  в  $B$ , равно «времени», требуемому для прохождения света из  $B$  в  $A$ ». Поэтому он задает  $\tau_1 = (1/2)(\tau_2 - \tau_0)$  для того, чтобы описать прохождение светового сигнала в обоих направлениях с точки зрения наблюдателя в движущейся системе, а затем постулирует, что это равенство между продолжительностью прохождения пути «вперед» и пути «назад» остается справедливым и при измерении этой продолжительности с помощью часов покоящейся системы. Он записывает:

$$t_0 + x_0/(c - v) = (1/2)[t_0 + t_0 + x_0/(c - v) + x_0/(c + v)].$$

Момент времени отправления сигнала  $t_0$  в этом уравнении сокращается и остается:

$$x_0/(c - v) = (1/2)[x_0/(c - v) + x_0/(c + v)].$$

Это — фундаментальное уравнение релятивистской системы Эйнштейна. Укажем, что оно по сути основывается на новом постулате, который можно сформулировать так: ««Время», необходимое для того, чтобы свет прошел от  $A$  до  $B$  и от  $B$  до  $A$  всегда равно половине «времени», которое требуется, чтобы пройти туда и обратно от  $A$  до  $B$ ».

Посмотрим, как, пользуясь этим постулатом, Эйнштейн получил формулу для местного времени.

В начале он указывает, что время  $t_0$  — момент испускания луча — выбирается произвольно. Поэтому он заменяет  $t_0$  на  $t$ . Тогда переменная  $\tau$ , соответствующая местному времени, становится функцией  $t$  и  $x_0$  (я опускаю рассмотрение по осям  $y$  и  $z$ , которые не играют никакой роли, поскольку движение рассматривается по оси  $x$ ). Эта функция выглядит так:  $\tau(x, t)$ . Согласно Эйнштейну, она удовлетворяет следующему уравнению:

$$\tau(x_0, t + x_0)/(c - v) = (1/2)[\tau(0, t) + \tau(0, t + x_0)/(c - v) + x_0/(c + v)].$$

На данном этапе значения функции  $\tau(x, t)$  известны только в трех точках по оси  $x$ . Как из этого скудного набора выудить вид функции, которая была бы справедлива для всех точек оси  $x$ ? Эйнштейну это удастся, вполне вероятно, не без помощи Мишеля Бессо, который лучше него разбирался в математике.

Одно из «ценных указаний» Бессо, похоже, проявляется именно здесь, тем более, что Эйнштейн удовлетворяется тем, что называет его в своей статье «очевидным»: он преобразовывает уравнение для трех точек в дифференциальное уравнение в частных производных общего вида: «Если взять  $x_0$  бесконечно малым, то отсюда следует

$$(1/2)[1/(c-v) + 1/(c+v)](\partial\tau/\partial t) = \partial t/\partial x_0 + (\partial\tau/\partial t)/(c-v), \text{ или} \\ \partial\tau/\partial x_0 + [v/(c^2 - v^2)](\partial\tau/\partial t) = 0»$$

и далее он быстро продвигается вперед, чтобы получить желаемый результат, который излагает следующим образом: «... из этих уравнений следует  $\tau = a[t - vx_0/(c^2 - v^2)]$ , где  $a$  — неизвестная пока функция...».

Тут Эйнштейн неудачно выбирает обозначения: он заменяет символ  $a$ , представляющий «неизвестную пока функцию», новым символом « $\varphi(v)$ », тем самым создавая впечатление, что он положил  $a = \varphi(v)$ . Но это совсем не так. Чуть ниже, продолжая выкладки, он пишет: «Подставляя вместо  $x_0$  его значение [т.е.  $x_0 = x - vt$ ], получаем  $\tau = \varphi(v)\beta(t - vx/c^2)$ , где  $\beta = 1/\sqrt{(c^2 - v^2)}$ , а  $\varphi$  — неизвестная пока функция  $v$ ». Но эта новая функция  $\varphi(v)$  имеет вид  $\beta a$ , а не  $a$ . В результате, во всех дальнейших уравнениях, содержащих  $\varphi(v)$ , будет постоянно недоставать множителя  $\beta$ . Недосмотр? Возможно, но все приходит в норму, если учитывать такое непоследовательное применение обозначений.

Эйнштейн показывает, что должно выполняться соотношение  $\varphi(v) = 1$  (что соответствует у Лоренца и Пуанкаре условию « $l = 1$ »), и записывает в окончательном виде уравнение для местного времени (не называя его так), которое во всех деталях совпадает с уравнением, полученным Лоренцом.<sup>4</sup>

## Относительность пространства

Получив выражение для местного времени в виде решения уравнения в частных производных, Эйнштейн переходит к преобразованиям пространственных координат. Он заявляет: «Пользуясь этим результатом, легко найти [пространственные координаты в движущейся системе, для чего нужно] с помощью уравнений выразить то обстоятельство, что свет при измерении в движущейся системе также распространяется со скоростью  $c$ ».

[Существенно здесь лишь рассмотрение пространственной координаты по «оси  $x$ ». Для большей ясности я далее буду пользоваться символом  $x'$  вместо применявшегося Эйнштейном символа  $\xi$ .]

Вернемся к эйнштейновскому выражению для местного времени  $\tau = a[(t - vx_0/(c^2 - v^2))]$ . Световой сигнал распространяется со скоростью  $c$ , откуда получаем  $x' = c\tau$ . Объединяя эти выражения, получаем:  $x' = ca[(t - vx_0/(c^2 - v^2))]$ . И здесь встречается фраза, на которой стоит ненадолго остановиться, поскольку она демонстрирует некоторую путаницу, если не в рассуждениях Эйнштейна, то в его формулировках. Он пишет: «относительно начала координат [движущейся с постоянной скоростью] системы луч света

при измерении, произведенном в покоящейся системе, движется со скоростью  $c - v$ , вследствие чего  $x_0/(c - v) = t$ ».

Формулируя выражение для скорости  $c - v$ , Эйнштейн применяет чисто галилеевское «правило сложения скоростей», которое ни в коей мере не является релятивистским! А может быть он просто неудачно выразился, а может быть он втихомолку, чтобы сохранить свое построение, повел вычисления так, чтобы получить желаемый результат? В самом деле, если принять, что луч света перемещается по отношению к началу координат движущейся системы отсчета согласно выражению  $c - v$  «при измерении, произведенном в покоящейся системе», то получается, как и у Эйнштейна  $t = x_0/(c - v)$ .

Второй интересный момент встречается чуть дальше в ходе вычислений: Эйнштейн заменяет  $x_0$  в этом выражении на  $x - vt$ ... что равнозначно предположению о том, что фиксированная точка  $x_0$  в движущейся системе перемещается вдоль оси  $x$  согласно формуле классической механики Галилея! Комбинируя обе эти «находки», Эйнштейн получает окончательный желаемый результат:  $x' = \beta(x - vt)$ , где  $\beta = 1/\sqrt{(v^2 - c^2)}$ .

Любопытно отметить, что такой предложенный вывод относительности пространства непосредственно вытекает из использования выражения для местного времени — это обстоятельство позволило Герману Минковскому, профессору Цюрихского политехникума того времени, когда там учился Эйнштейн, указать три года спустя: «Понятие пространства не пересмотрели ни Эйнштейн, ни Лоренц [...] Попытку перешагнуть через понятие пространства соответствующим образом в самом деле можно было бы расценить как некоторую дерзость математической мысли».\* Возможно, Минковский усмотрел пробелы в рассуждениях Эйнштейна в 1905 г. при определении относительности пространства.

## Снова $l = 1$

Эйнштейну остается показать, что «неизвестная пока функция»  $\varphi(v)$  обязана иметь значение  $\varphi(v) = 1$  в соответствии с результатом  $l = 1$ , полученным Лоренцом и Пуанкаре.

Для этого он вводит новую систему координат, которая совершает поступательное движение со скоростью  $-v$  по «оси  $x$ » по отношению к движущейся системе. По всей видимости, это есть не что иное, как покоящаяся система, которая также, по отношению к движущейся системе, считающейся сейчас покоящейся, поступательно перемещается со скоростью  $-v$ . [Каждый хотя бы однажды сталкивался с подобной ситуацией — вы сидите в поезде и смотрите на платформу, поезд начинает медленно набирать ход и вам кажется, что это платформа двигается назад...].

«После двукратного применения наших формул преобразования», как то и ожидалось, он показывает, что его новая система оказывается точной копией первой, покоящейся системы. Отсюда он заключает, что должно выполняться соотношение  $\varphi(v)\varphi(-v) = 1$ . Затем он «доказывает», что  $\varphi(v) = \varphi(-v)$ . Объединяя эти два результата, он получает  $\varphi(v) = 1$ .

Чтобы получить соотношение  $\varphi(v) = \varphi(-v)$ , он рассматривает «твердый стержень» длины  $L$ , помещенный вертикально по отношению к оси  $x$  в

\* Г. Минковский, *Пространство и время*, доклад, сделанный 21 сентября 1908 г., перевод см. в УФН, октябрь 1959 г. — (прим. перев.)



движущейся системе. Измеренная в покоящейся системе, его длина есть  $L/\varphi(v)$  при перемещении в одном направлении, и  $L/\varphi(-v)$  при перемещении в противоположном направлении. Из соображений симметрии нужно иметь  $L/\varphi(v) = L/\varphi(-v)$ , а отсюда  $\varphi(v) = \varphi(-v)$ .

Физики в своей массе не обратили особого внимания на довольно трудоемкий процесс, предложенный Эйнштейном при «выводе» уравнений преобразований Лоренца для пространства и времени. Но они усвоили, что благодаря Эйнштейну «местное» время и «истинное» время оказались одним и тем же. Этот результат Ив Пьерсо излагает в своем детальном исследовании следующим образом: «В итоге, Эйнштейн, исходя из идентичности часов в двух системах [покоящейся и движущейся], строго получает выражение для местного времени Лоренца–Пуанкаре, но [добавляет он] речь более не идет о местном времени  $\tau$ , связанном с истинным временем  $t$ , поскольку скрытая переменная устраняется: время  $\tau$  (“совокупность показаний часов  $\tau$ ”) определяет состояние движущейся системы  $k$  точно так же, как время  $t$  (“совокупность показаний часов  $t$ ”) передает состояние покоящейся системы  $K$ ».<sup>5</sup>

Как примерный, но шаловливый ребенок Эйнштейн пояснял: «неожиданно оказалось, что необходимо лишь достаточно точно сформулировать понятие времени, чтобы обойти только что изложенную трудность [т.е. объяснить результат опыта Майкельсона–Морли]. Следовало лишь понять, что введенную Лоренцем вспомогательную величину, названную им “местным временем”, на самом деле следует определить как “время”».\* Лоренцу же казалось, что «...имеется различие между системами  $x, t$  и  $x', t'$ . [...] В частности, переменную  $t'$  нельзя было называть “временем” в том же смысле, что и переменную  $t$ ».

Как же ко всему этому относиться? При помощи своих часов и лучей света Эйнштейн превратил относительность в своего рода оптическую иллюзию, которой обманываются “ньютоновские” наблюдатели, поскольку каждый из них старается своими собственными приборами (синхронизированными часами и твердыми стержнями) измерить то, что происходит у соседа. Совершая этот подвиг, он преодолел (даже не подозревая об этом) все встретившиеся на его пути трудности. Насладимся же тем, как он все это проделал.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Репродукция этого портрета воспроизводится в книге K. Sugimoto, *Albert Einstein*, Belin, 1990, p. 102.

<sup>2</sup>Приводится в A. Pais, *'Subtle is the Lord...'*, op. cit., p. vi.

<sup>3</sup>Poincaré H., «La mesure du temps» в *La Revue de Métaphysique et de Morale*, t. VI, janvier 1898, p. 1.

<sup>4</sup>Выражения для  $x'$  и  $t'$  можно представить в различном виде. Эйнштейн выбрал тот же вид, что и у Лоренца в его статье 1904 г., несмотря на несимметричность формулы для  $t'$  — отсюда следует, что он был знаком с той работой Лоренца.

\* Автор не указывает, что этой фразы нет в обсуждаемой статье 1905 г.; она взята из обзорной статьи Эйнштейна 1907 г., см. *Jahrb. Rad. Elektr.* 1907, Bd 4, s. 411, Собрание научных трудов, т. 1, с. 65. — (прим. перев.)

<sup>5</sup>Pierseaux Y., *La «structure fine» de la Relativité Restreinte*, L'Harmattan, 1999, p. 261.  
Под «скрытой переменной» Пьерсо имеет в виду «эфир», присутствующий, по его мнению, в теории относительности Лоренца (это так) и Пуанкаре(?), и отсутствующий у Эйнштейна(!).

## Эйнштейн завершает прославившую его статью

### Фундаментальная трудность

В упоминавшейся статье Ива Пьерсо *La «structure fine» de la Relativité Restreinte*\* отмечается: «[Американский физик] Миллер, составивший наиболее полную историю создания Эйнштейном специальной теории относительности, так отзывается о его выводе преобразований Лоренца: “Трудно представить себе, что Эйнштейн вывел релятивистские преобразования тем методом, который приведен в его статье 1905 г., тем более что он никогда после его не использовал”».<sup>1</sup>

По какой же причине вскоре после вывода уравнений преобразований Лоренца Эйнштейн разочаровался в нем настолько, что никогда более не использовал?

Эйнштейн сам дал ответ на это вопрос при весьма любопытных обстоятельствах.

Во время заседания Общества естествоиспытателей, проходившего в Цюрихе 16 января 1911 г., Эйнштейн выступил с докладом «Теория относительности». За докладом последовала дискуссия. Профессор Кляйнер (тот самый, что отверг первую диссертацию Эйнштейна в 1901 г. и принял вторую в 1905 г.) выступил первым.

Он торжественно заявил: «По поводу принципа относительности говорят, что он революционен. Это в особенности справедливо применительно к постулатам, которые являются чисто эйнштейновскими нововведениями в наши физические представления о Вселенной [...]».

В ответном слове Эйнштейн заявляет: «Прежде всего я хотел бы поблагодарить профессора Кляйнера за любезные слова, сказанные в мой адрес. Кроме того, я хотел бы сделать несколько замечаний. Согласно теории относительности, твердое тело никак не может существовать. Представим себе стержень определенной длины. Если потянуть за его конец, то другой конец тут же придет в движение. Это означало бы распространение сигнала [от одного конца стержня к другому] с бесконечной скоростью, сигнала, который мог бы использоваться для определения времени, что привело бы к невероятным последствиям, на коих я не буду здесь останавливаться».<sup>2</sup>

Одним словом, использование «твердых стержней» в теории относительности по сути несовместимо с этой теорией.<sup>3 4</sup>

В «электродинамической части» своей статьи Эйнштейн получает уравнения преобразования электрической и магнитной составляющих уравнений Максвелла «с точностью до множителя  $\psi(v)$  ... который может, вообще говоря, зависеть от  $v$ ». Почему он пишет  $\psi(v)$ , а не  $\varphi(v)$ , как ранее? Это что, другой множитель? Эйнштейн этого не объясняет, но тем не менее, и здесь полагает  $\psi(v) = 1$ .

Здесь он делает важное замечание. Он вводит «...единичный точечный заряд, [который] движется в электромагнитном поле». Речь идет об «электроне Лоренца», но, как мы видели, Эйнштейн хочет держаться подальше от теории электронов.<sup>5</sup> Мы уже знаем ответ на вопрос, какая сила на него действует — это *elektrische Kraft*. Однако *elektrische Kraft* не входит

\* «Тонкая структура» специальной теории относительности. — (прим. перев.)

в теорию Максвелла, на которой основывается Эйнштейн. Исключая ее из рассмотрения, он требует, «... чтобы справедливые в системе  $S'$  уравнения Максвелла–Герца для пустоты были бы также справедливы и в системе  $S$ ». Исходя из этого, он получает уравнения преобразования электрической и магнитной компонент для уравнений Максвелла.

Итак, он *принимает за основу* своих рассуждений то, что уравнения Максвелла *должны* сохранять свою форму при применении преобразований Лоренца к координатам пространства и времени. Тем самым он вводит в свою теорию новую гипотезу.<sup>6</sup> Весьма примечательно, что эта новая гипотеза приводит к выводу, что независимое введение постулата постоянства скорости света (который и так есть неотъемлемая часть теории Максвелла!) становится ненужным. Вскоре это поймет и сам Эйнштейн.<sup>7</sup>

## Сила Лоренца открыта заново

Итак, Эйнштейн предполагает, что уравнения Максвелла сохраняют форму — инвариантны — относительно преобразований Лоренца. Исходя из этого, он получает уравнения для электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля. При этом он подмечает интересную вещь: электрический заряд, пребывающий *в покое* в *движущейся системе* (*идеальный* электрон по терминологии Лоренца), испытывает на себе действие лишь электрической составляющей. В *покоящейся* же системе, в которой *движется* сам заряд (*абсолютной* системе по терминологии Лоренца), на него «кроме электрического поля» действует еще и «электромоторная сила», равная, согласно Эйнштейну, если пренебречь членами второго и выше порядков относительно  $v/c$ , «деленному на скорость света векторному произведению скорости движения единичного заряда на напряженность магнитного поля».

Это и есть заново открытая сила Лоренца; чтобы ее найти Эйнштейну пришлось пренебречь членами порядка квадрата аберрации. Значит, он не добавил ничего существенного к уже сделанному Лоренцем.

## Незначительная ошибка, и тем не менее...

В конце статьи Эйнштейн продолжает описывать динамику электрона, движущегося с *очень малым ускорением*, следуя уже ставшему классическим подходу Абрагама. Как мы видели, это приводит к выражениям для *продольной* и *поперечной* масс электрона.

В качестве модели электрона Эйнштейн выбирает твердое тело, «которое в покоящемся состоянии имеет форму шара, а в движущемся состоянии — при наблюдении из покоящейся системы — принимает форму эллипсоида».<sup>8</sup> Это та же модель, что и у Лоренца, однако Эйнштейн подходит к вычислению массы не с позиций электродинамики. Он просто использует ньютоново выражение для массы тела  $F = ma$  и задается вопросом, как преобразовывать силу, входящую в это уравнение.

К сожалению, он делает неправильный выбор и в конце концов получает для поперечной массы выражение  $m_{\perp} = k^2 m$  вместо правильного, полученного Пуанкаре выражения  $m_{\perp} = km$ . Затем он пытается определить кинетическую энергию электрона. Электрон, движущийся с очень малым

ускорением, то есть не излучающий энергии, получает кинетическую энергию «взятую у электростатического поля». Эйнштейн вычисляет ее и получает  $mc^2[1/\sqrt{(1-v^2/c^2)}-1]$ . Дальше он не идет, но  $E = mc^2$  уже витает в воздухе!

## Дополнения

В опубликованной в 1971 году книге *История принципа относительности*, Мари-Антуанет Тонеля — один из лучших французских специалистов в этой области (она долго преподавала теорию относительности в институте Анри Пуанкаре в Париже) решительно отвергла утверждения, согласно которым все то новое, что есть в специальной теории относительности Эйнштейна, почти полностью содержалось в написанных ранее статьях Лоренца и Пуанкаре. Она писала: «Своей книгой *История теорий эфира и электричества* сэр Эдмунд Уиттекер внес значительный вклад в распространение такого мнения. Согласно Уиттекеру, статья Эйнштейна 1905 года лишь “развила теорию относительности Лоренца и Пуанкаре, с некоторыми ее дополнениями, которые, похоже, и привлекли значительное внимание”».<sup>9</sup>

Поищем же вместе с сэром Эдмундом, что это за «дополнения», привнесенные Эйнштейном в теорию относительности. Они присутствуют в двух разделах второй части статьи. Первый раздел называется «Теория аберрации и эффекта Доплера».

Читатель помнит, что заинтересовавшись эффектом Доплера,<sup>10</sup> Фогт первым обнаружил существенные детали преобразования Лоренца. Эйнштейн воспроизводит рассуждения Фогта и, в свою очередь, присовокупляет их к уравнениям «замены переменных» Лоренца. При этом он получает следующие результаты: если обозначить через  $A$  амплитуду электрической или магнитной составляющей электромагнитного поля в *покоящейся* системе, величина этой амплитуды в *движущейся* системе задается выражением  $A'^2 = A^2[(1-v/c)/(1+v/c)]$ . Кстати, если обозначить через  $\nu$  частоту, излучаемую источником света в *покоящейся* системе, частота в *движущейся* системе имеет величину  $\nu' = \nu\sqrt{[(1-v/c)/(1+v/c)]}$ .

В следующем разделе, озаглавленном «Преобразование энергии лучей света», Эйнштейн представляет себе сферу, которая вместо того, чтобы содержать электричество, как в электронах Абрагама и Лоренца, содержит «световой комплекс».<sup>11</sup> «Обозначая через  $E$  энергию света, заключенную внутри рассматриваемой поверхности и измеренную в покоящейся системе, а через  $E'$  ту же энергию, измеренную в движущейся системе, получаем  $E' = E\sqrt{[(1-v/c)/(1+v/c)]}$ . Замечательно то, что и энергия, и частота светового комплекса с изменением состояния наблюдателя меняются по одному и тому же закону». Это замечание предвосхищает еще одну великую революцию, которая вскоре потрясет физику.<sup>12</sup>

## Как и должно быть...

В конце кинематической части своей статьи Эйнштейн пишет: «Отсюда видно, что такие параллельные преобразования [Лоренца], как это и должно быть, образуют группу».

*Как и должно быть...* Возможно, это отзвук того, что написал Пуанкаре в своей заметке от 5 июня: «Ансамбль всех этих преобразований вместе

со всеми вращениями в пространстве *должен образовывать группу* [курсив мой]».

В отличие от Пуанкаре Эйнштейн не делает отсюда никакого вывода. В теории относительности Пуанкаре «группа Лоренца» определяет геометрию новой системы мира. В теории относительности Эйнштейна фундаментом являются «синхронно идущие часы» и «твердые стержни», которые эйнштейновские наблюдатели используют для своих наблюдений. При таком подходе «относительность» возникает только тогда, когда один наблюдатель хочет измерить что-то происходящее в системе другого наблюдателя, движущегося относительно него прямолинейно и равномерно. Иными словами, в теории Эйнштейна каждый наблюдатель живет в мире, где он «покоится» и в котором, как заявляет Эйнштейн в начале своей статьи, «... справедливы уравнения механики Ньютона».

## Попытка спастись

Стараясь быть «святее Папы» и не желая отказаться от идеи о том, что (похвальные) попытки Эйнштейна могли быть напрасны, его сторонники, особенно во Франции, придумали «объяснение», которое позволило бы выбраться из тупика, созданного его «третьим постулатом» — гипотезой существования в природе «твердых стержней» и «синхронных часов», который, по их мнению, представляется приемлемым постулатом, известным под именем «принципа тождественности единиц измерения». Друг Эйнштейна Макс Борн, похоже, первым осознал всю сложность проблемы. Вот как резюмирует ситуацию Ив Пьерсо: «Эйнштейновская аксиома тождественности единиц измерения на самом деле может оправдываться только в квантовых рамках». И далее он уточняет: «В эйнштейновском выводе синхронизация требует определения “*кванта (единицы) времени*”» [курсив Пьерсо]. После чего он делает важное замечание: «Эта третья аксиома постепенно полностью исчезла из стандартных изложений специальной теории относительности».<sup>13</sup>

Трудность заключается в том, что в квантовой физике признается наличие в природе элементарного кванта «действия». Признание наличия элементарного кванта «времени» означало бы возврат к абсолютной системе мира Ньютона, что никак не соответствовало ни квантовой механике, ни теории относительности. Одним словом, в 1905 г. Эйнштейн со своими твердыми стержнями и синхронными часами никак не мог выбраться за пределы... абсолютного пространства Ньютона.

## Тавтология Эйнштейна

27 сентября 1905 г. Эйнштейн направляет в журнал *Annalen der Physik* короткое сообщение в три с половиной страницы, озаглавленное вопросом: «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?». Спустя восемь месяцев, 27 мая 1906 г. он направляет в *Annalen* вторую статью на ту же тему: «Закон сохранения движения центра тяжести и инерция энергии».<sup>14</sup>

Эта статья важна в двух отношениях. Вначале Эйнштейн отмечает: «В опубликованной в прошлом году работе [тут он ссылается на статью от 27 сентября 1905 г.] мы показали, что изменение энергии на величину

$\Delta E$  должно соответствовать эквивалентному изменению массы на величину  $\Delta E/V^2$ , где  $V$  — скорость света». Далее он продолжает: «Несмотря на то, что простое формальное рассмотрение, которое должно быть проведено для доказательства этого утверждения, в основном содержится в работе А. Пуанкаре [он ссылается на статью Пуанкаре 1900 г.], мы из соображений наглядности не будем основываться на этой работе».

Итак, не позднее весны 1906 г., по его собственным словам, Эйнштейн уже знал о выражении  $E = mc^2$ , опубликованном Пуанкаре в 1900 г.

Позаимствовав модель «пушки» Пуанкаре, он рассматривает тело, испускающее энергию величиной  $L/2$  в одном направлении и  $L/2$  в противоположном направлении. Испуская энергию в двух противоположных направлениях, это тело, эта электромагнитная «пушка», не испытывает отдачи. Затем Эйнштейн демонстрирует, что после испускания масса тела уменьшается на величину  $L/c^2$ , тогда  $L = mc^2$ .

Для доказательства\* он обозначает символом  $H$  энергию тела, измеренную после испускания «покоящимся» наблюдателем, и символом  $E$  ту же энергию, измеренную наблюдателем, «движущимся» по отношению к данному телу. Он обозначает символом  $K$  кинетическую энергию тела, измеренную движущимся наблюдателем, и утверждает: «Таким образом, ясно, что разность  $H - E$  может отличаться от кинетической энергии  $K$  тела [...] только на некоторую аддитивную постоянную  $C$ ». Итак, он полагает  $H - E = K + C$  и делает отсюда следующий вывод: «...если энергия изменится на величину  $L$ , то масса меняется соответственно на величину  $L/c^2$ ».

На самом деле, если правильно проделать приведенные выше выкладки, то получим  $H - E = (L/mc^2)(K + C)$ , а не  $H - E = K + C$ , как полагал Эйнштейн. Исключив в этом уравнении множитель  $(L/c^2)$ , он неявно положил его равным 1. В итоге, его «изложение» приводит к утверждению « $L/mc^2 = 1$ , откуда  $L/mc^2 = 1$ », что есть тавтология.<sup>15</sup>

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Pierseaux Y., *La «structure fine» de la Relativité Restreinte*, op. cit., p. 256.

<sup>2</sup>Обмен замечаниями между Эйнштейном и Кляйнером опубликован в отчете о заседании Общества естествоиспытателей Цюриха от 16 января 1911 г., *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 56, vol. IV, 1911.

<sup>3</sup>Вводя в своей статье *Versuch* представление о «бронзовых стержнях» для измерения длин, Лоренц полагал возможным изменение длины не только в направлении их движения, но и в перпендикулярном направлении. «Если, например, размеры в направлении параллельном движению изменяются в отношении 1 к  $1 + \delta$ , а в направлении ему перпендикулярном в отношении 1 к  $1 + \varepsilon$ , то уравнение  $\varepsilon - \delta = v^2/2c^2$  позволяет учесть результаты наблюдений». Lorentz, *Versuch*, op. cit., 1895, § 90.

<sup>4</sup>Отметим также любопытный результат, полученный в 1926 г. математиком Ллевелином Томасом. Он установил, что если после преобразования Лоренца, соответствующего скорости  $v$  с направлением  $x$ , применить такое же второе преобразование для скорости  $v'$  в другом направлении, результат будет иным, чем при преобразовании для суммы скоростей  $v + v'$ , имеющих разные направления. В результате, проблема использования

\* Начиная отсюда, автор цитирует не статью Эйнштейна от 27 мая 1906 г., а предыдущую статью от 27 сентября 1905 г., не предупреждая об этом читателя. — (прим. перев.)

твердых стержней для измерения длин становится еще более запутанной. Thomas L., *Nature*, vol. 177, 1926, p. 514; *Philosophical Magazine*, vol. III, 1927, p. 1.

<sup>5</sup>В этом самоограничении видится «маховское влияние», как если бы Эйнштейн колебался, считать ли «реальным» существование в природе элементарных частиц.

<sup>6</sup>По этой причине неверно утверждать, как это часто делается, что Эйнштейн *доказал* инвариантность уравнений Максвелла по отношению к преобразованиям Лоренца. Он это не *доказал*, а *принял*, что совсем не одно и то же. Что не помешало А. Пайсу в книге *Subtle is the Lord...*, p. 144 (*Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*, стр. 139) написать: «В июньской статье Эйнштейн применил свои постулаты так, как сейчас это излагается в учебниках». Он приводит восемь примеров, последний из которых таков: «Эйнштейн доказал лоренц-ковариантность уравнений Максвелла–Лоренца сначала для поля без источников, а затем и для поля с источниками. [...] Эйнштейн получил то, что он назвал “новым способом” выражения силы Лоренца. В то время как Лоренц ввел [эту силу] в качестве нового предположения, Эйнштейн получил ее кинематически как чисто электрическую силу, которая действует на заряженную частицу, в данный момент находящуюся в покое». Очевидно, Пайс недостаточно тщательно проверил насколько справедливо его высказывание: «Для демонстрации обратитесь к статье Эйнштейна». Обратившись к этой статье легко видеть, что ничего такого, несмотря на уверения, Эйнштейн не говорил.

<sup>7</sup>В статье, представленной в *Annalen der Physik* три месяца спустя, он пишет: «Использованный нами принцип постоянства скорости света, естественно, содержится в уравнениях Максвелла».

<sup>8</sup>См. статью *К электродинамике...*, §4.

<sup>9</sup>Tonnellat M.-A. *Histoire du principe de relativité*, op. cit., p. 115.

<sup>10</sup>Напомним, что эффект Доплера описывает распространение волны от источника, удаляющегося или приближающегося к наблюдателю. Интересно отметить, что первая значительная статья Маха была посвящена эффекту Доплера.

<sup>11</sup>В своей мартовской статье Эйнштейн сформулировал гипотезу «световых квантов». Возможно, именно в этом смысле следует понимать введенное им понятие «светового комплекса».

<sup>12</sup>Соотношение  $E = mc^2$  устанавливает соотношение между энергией и массой, в то время как аналогичное соотношение, установленное Эйнштейном,  $E = h\nu$ , где  $h$  есть квант действия Планка, задает соотношение между энергией и частотой.

<sup>13</sup>Pierseaux Y., *La «structure fine» de la Relativité Restreinte*, op. cit., p. 17.

<sup>14</sup>Einstein A., *Annalen der Physik*, 20, 1906, p. 627, Собрание научных трудов, т. 1, с. 39.

<sup>15</sup>Эта тавтология была впервые продемонстрирована в 1952 г. американским физиком Генри Ивом в *Journal of the Optical Society of America*, 42, 8, p. 540. См. также выступление Кристиана Бизуара из группы SYRTE Парижской обсерватории во время «Дня Анри Пуанкаре», проходившего в Горном институте в Париже 7 октября 2004 г.



# Переходный период

Я был бы счастлив, если бы Вы могли разрешить  
некоторые вновь возникшие затруднения.

Хендрик Антон Лоренц  
*Письмо Анри Пуанкаре, 8 марта 1906 г.*

## А тяготение?

### Пуанкаре формулирует задачу

В 1905 г. Кауфман и особенно Абрагам пришли к твердому убеждению, что электрон не обладает *механической* массой.

Пуанкаре придерживается другой точки зрения. В 1902 г., касаясь в работе *Наука и гипотеза* вопроса о массе, он для начала невинно отмечает: «Ускорение тела равно действующей на него силе, деленной на его массу».<sup>1</sup> Затем, как физик, он задает вопрос: «Можно ли проверить на опыте этот закон? Для этого нужно было бы измерить три величины, входящие в его выражение: ускорение, силу и массу». Далее он отмечает: «Отвлекаясь от трудности, связанной с измерением времени, допустим, что возможно измерить ускорение. Но как измерить силу, или массу?».

С иронией он продолжает: «Что такое *масса*? Это, отвечает Ньютон, произведение объема на плотность. Лучше сказать, возражают Томсон и Тейт,\* что плотность есть частное от деления массы на объем. Что такое *сила*? Это, отвечает Лагранж, причина, производящая или стремящаяся произвести движение тела. Это, скажет Кирхгофф, произведение массы на *ускорение*. Но тогда почему не сказать, что масса есть частное от деления силы на ускорение».

Уже как философ, он заключает: «Определяя силу как причину движения, мы становимся на почву метафизики. [...] Чтобы это определение могло быть к чему-то пригодно, оно должно научить нас *измерению* силы; к тому же этого условия и достаточно; нет никакой необходимости, чтобы определение научило нас тому, что такое *сила сама по себе*, или тому, есть ли она причина или следствие движения».

В конце своей статьи от 5 июня 1905 г. Пуанкаре применяет эти тезисы на практике.

---

\* Английские физики Вильям Томсон, лорд Кельвин (1824–1907) и Питер Гатри Тейт (1831–1901) были авторами фундаментального труда по физике того времени — *Трактата по натуральной философии*, в двух томах. Опубликован в 1867 г. — (прим. перев.)

С точки зрения *физики*, фундаментальный результат таков: отныне следует формулировать законы природы в рамках четырехмерного пространства. То есть вся физика теперь имеет четыре измерения. Не пытаясь «определить» что такое сила, можно тем не менее задать вопрос «а каково ее *четвертое измерение*», в частности, каково четвертое измерение силы тяготения?

Математик Пуанкаре легко отвечает на этот вопрос: ко всякой силе, имеющей составляющие  $X, Y, Z$  в обычном пространстве, нужно добавить четвертую составляющую  $T$  в четырехмерном пространстве, «которое нужно построить так, чтобы четыре составляющие преобразовывались так же, как  $x, y, z, t$ , а именно, чтобы  $X' = k(X + \varepsilon T), Y' = Y, Z' = Z, T' = k(T + \varepsilon X)$ ». Это еще один триумф «математического склада ума».

Но продолжим. У тяготения есть определенные особенности, отличающие его от остальных сил. Они и позволили Ньютону представить тяготение в виде мгновенного «действия на расстоянии», убывающего обратно пропорционально квадрату расстояния. Пуанкаре также учитывает эти особенности, когда принимается за анализ тяготения в рамках новой динамики.

Он рассматривает «притягиваемое тело» и «притягивающее тело», и определяет силу притяжения между ними следующим образом: 1) она должна подчиняться преобразованиям Лоренца согласно приведенным выше уравнениям; 2) она «должна сводиться к закону тяготения Ньютона, когда [...] скорости достаточно малы, чтобы можно было пренебречь квадратичными членами, включающими скорость света».

Его выкладки, основанные на теории групп, приводят к триединому выводу:

1. распространение тяготения «не мгновенно, но происходит со скоростью света»;
2. тяготение распространяется в виде того, что он назвал «волнами тяготения»;<sup>2</sup>
3. модифицированное тяготение состоит из двух сил — одна из них параллельна прямой, соединяющей два тела (это есть классическая сила Ньютона), «а другая параллельна скорости [притягивающего тела]» — это *релятивистская поправка* к теории Ньютона.

Пуанкаре заканчивает свои выкладки — первую попытку построения релятивистской теории тяготения — следующим замечанием: «[Возникает вопрос], соответствуют ли полученные результаты астрономическим наблюдениям. [...] Узнать это можно только в результате детальных обсуждений».

*Астрономическим наблюдениям.* . . . Пуанкаре пишет это не для того, чтобы после насладиться результатами наблюдений других. Помимо того, что он не имеет равных как математик и физик, он еще один из самых известных в свое время специалистов по небесной механике, а потому он и хочет сделать из своих результатов соответствующие выводы. . .

## Меркурий озадачивает

Мы уже познакомились с Пуанкаре-математиком, а также с ним как с физиком и философом. . . Теперь настало время рассказать о Пуанкаре—

астрономе, которому президент Лондонского Королевского астрономического общества сэр Джордж Дарвин сказал по случаю торжественного вручения 9 февраля 1900 года золотой медали за заслуги в области астрономии, с некоторой свойственной в подобных случаях только англичанам сдержанностью: «Исследования г-на Пуанкаре столь разносторонни и проведены со столь обширными познаниями, что я чувствую себя не вполне способным в достаточной мере справиться с этим трудным поручением». <sup>3</sup> Упомянув *Новые методы небесной механики* <sup>4</sup> — фундаментальный труд в трех томах, только что законченный Пуанкаре, он отмечает:

«В последующие полвека этот трактат, скорее всего, послужит источником, из которого будут черпать другие, менее выдающиеся исследователи. Этот источник настолько глубок, а мысли столь грандиозны, что мне весьма трудно словами оценить этот трактат, как он того заслуживает...».

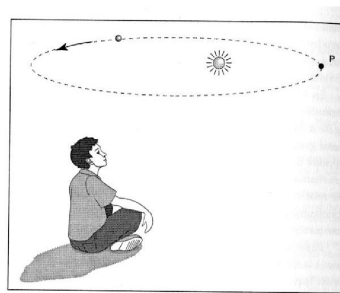
В 1906 г. Пуанкаре читает курс лекций по общей астрономии в Политехнической школе. В ходе одной из лекций он рассказывает студентам об Урбэне Леверье, который в 1859 г. во время наблюдений за ближайшей к Солнцу планете — Меркурием — обнаружил, что его орбита напоминает «розетку», то есть эллипс, медленно обращающийся вокруг фокуса, в котором находится Солнце. Астрономы всего мира тут же принялись искать объяснений причин такого движения.

Точка орбиты, находящаяся на минимальном расстоянии от Солнца, называется *перигелием*. Наблюдения Леверье показали, что перигелий Меркурия медленно, год за годом, смещается за *столетие* на 9 дугowych минут и 32 секунды. Хотя эффект и слабо выражен, он, тем не менее, существует. Учитывая возмущения орбиты Меркурия со стороны других планет, американский астроном Саймон Ньюком (1835–1909) смог рассчитать и объяснить, чем вызывается основная доля смещения в 529 дугowych секунд, но оставшимся 43 секундам он объяснения не нашел. <sup>5</sup> Это небольшое различие между «вычисленной» и «наблюдаемой» величинами заинтриговало астрономов, которые назвали его *аномалией*.

«Леверье приписал эту аномалию влиянию еще не открытой планеты, — рассказывал Пуанкаре, — а один астроном-любитель даже вроде бы наблюдал ее прохождение перед диском Солнца. С тех пор ее больше никто не видел, и, похоже, что якобы наблюдавшаяся планета была лишь птичкой».

Ньюком раздумывал, не следует ли принять гипотезу, что «сила притяжения Солнца изменяется не в точном соответствии с законом Ньютона». Однако такое хитроумное объяснение подрывало сам фундамент ньютонова закона об изменении силы тяготения обратно пропорционально квадрату расстояния, который теперь называется «законом всемирного тяготения». Ведь только благодаря этому закону эллиптические орбиты планет являются устойчивыми. Любое, даже малейшее отклонение от этого закона приводило бы к вращению эллипсов вокруг самих себя. Но ведь именно это и наблюдается у Меркурия! Оказалось даже, что если в законе всемирного тяготения заменить 2 на 2,0000001574, как аномалия словно по волшебству исчезает! Но как обосновать введение такого числа в теорию? <sup>6</sup>

В 1902 году последовал еще один сюрприз. Астроном Пауль Гербер публикует формулу расчета аномалии:  $24\pi^3 a^2 / T^2 V^2 (1 - e^2)$ , где  $a$  есть большая полуось эллипса,  $e$  его эксцентриситет, <sup>7</sup>  $T$  — период обращения, а  $V$  — скорость распространения силы тяготения. Если положить  $V = c$ , как то следует из релятивистской теории тяготения Пуанкаре, формула работает



Как и другие планеты солнечной системы, Меркурий движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. Очень точные астрономические наблюдения показали, что наиболее близкая к Солнцу точка орбиты, перигелий  $P$ , смещается относительно неподвижных звезд примерно на 9 дуговых минут и 32 секунды за столетие. Такое смещение в астрономии объясняют эффектами теории относительности.

прекрасно. Беда только в том, что Герберу не удалось дать удовлетворительное теоретическое объяснение своей формуле.

Возвращаясь к подходу к тяготению, который он изложил в конце статьи 1905 года, Пуанкаре рассматривает возможность релятивистского объяснения аномалии: «Лишь астрономические наблюдения могут объяснить различия между старой и новой механикой [механикой Ньютона и релятивистской механикой]. Результаты для других планет [...] совпадают, с точностью до ошибок наблюдений, с классической теорией».<sup>8</sup>

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Poincaré H., *La Science et l'Hypothèse*, op. cit., p. 117–118. Анри Пуанкаре, *Наука и гипотеза*, стр. 68.

<sup>2</sup>Это первое употребление такого термина в научной литературе. Пока поиски «гравитационных волн», как их теперь называют, ни к чему не привели.

<sup>3</sup>Выступление проф. Дарвина в Лондоне, 9 февраля 1900 г., цитируется по E. Lebon, *Henri Poincaré*, op. cit., p. 45.

<sup>4</sup>Poincaré H., *Les Méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, 3 vol., Gauthier-Villars, Paris, t. I, 1892, 385 p., t. II, 1895, 479 p., t. III, 1899, 414 p. Переиздание Albert Blanchard, Paris, 1987.

<sup>5</sup>Newcomb S., *The Elements of the Four Inner Planets*, US Government Printing Office, Washington DC, 1895.

<sup>6</sup>В 1911 г. голландский астроном Виллем де Ситтер (1872–1934) — признанный специалист в этой области, обнаружил любопытную вещь: расчет Пуанкаре дает релятивистское смещение на 7,15 дуговых секунд за столетие, чего недостаточно. Если же умножить этот результат на 6, получаем 42,9 дуговых секунд — правильный результат! Но почему нужно умножать полученное Пуанкаре число на 6 — неизвестно! В 1999 г. решение еще не было найдено. De Sitter W., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 71, 1911, p. 288. См. также Silberstein L., *Philosophical Magazine*, vol. 77, 1917, p. 503.

<sup>7</sup>Эксцентриситетом эллипса называется отношение расстояния между фокусами к длине большой оси. Эксцентриситет окружности равен нулю. Эксцентриситет орбиты Земли составляет примерно 0,017, а Меркурия около 0,206.

<sup>8</sup>Лишь у Меркурия (и еще не открытого в то время Плутона) эксцентриситет орбиты достаточно велик для обнаружения эффекта. Через год Эйнштейн тоже упомянет

об этом. На рождество 1907 г. он пишет Конраду Габихту: «Я работаю над релятивистским анализом закона тяготения, благодаря которому надеюсь объяснить непонятные вековые изменения перигелия Меркурия». Письмо Конраду Габихту, 24 декабря 1907 г., *The Collected Papers*, op. cit., vol. 5, doc. 69. Пройдет еще несколько лет, прежде чем его посетит «счастливейшая мысль в моей жизни». См. Pais A., *Subtle is the Lord...*, op. cit., p. 177 (А. Пайс, *Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна*, стр. 169), а также Fokker A.D., *Ned. Tydschr. Natuurk.*, vol. 21, 1955, p. 125.

## Интерлюдия

### Новичок

А чем же заняты геттингенские математики, пока Пуанкаре погружен в свои вычисления?<sup>1</sup>

Раз в неделю Гильберт и Минковский собирают студентов-математиков на семинар по математической физике под председательством Феликса Клейна. Минковский четко определил темы обсуждения на 1905–1906 гг.: работы Кауфмана и Абрагама, преобразования Лоренца, принцип относительности, электрон, происхождение массы. . . короче говоря, рассматривается электродинамика движущихся тел.<sup>2</sup>

Одним из самых старательных участников семинаров был молодой математик Макс Борн, родом из Бреслау. В свои 24 года он уже выполняет обязанности «личного» ассистента Гильберта. «Минковский рассказывал нам об электродинамике невероятные вещи», — вспоминал он позже.<sup>3</sup> Заканчивая диссертацию, Борн спросил у Гильберта как ему лучше подготовиться к устному экзамену по математике. «А какой раздел вы знаете хуже всего?» — спросил его Гильберт. «Теорию идеальных чисел». В день экзамена Гильберт стал его спрашивать именно об идеальных числах. В ответ на робкие протесты Борна Гильберт заметил, что всегда интересно, что экзаменуемый может сказать о неизвестной ему области.

Вскоре Борн вновь появится на этих страницах, причем сыграет в нашей истории весьма значительную роль, а пока познакомимся поближе с его учителем. Гильберт, которому только что исполнилось 43 года, однажды зимним утром заявляет, что решил научиться. . . кататься на лыжах. Под влиянием своего коллеги заядлого спортсмена Карла Рунге (1856–1927), он выписывает из Норвегии лыжи с ботинками и опробует их на пологом спуске в долинке позади гостиницы *Der Rohns*. Одна лыжа тут же слетает и укатывается далеко вниз по спуску. Отчаявшись ее отыскать, Гильберт водружает другую на плечо и добредает до гостиницы, где сталкивается с Минковским. «А почему же вы не пустили вторую лыжу вслед за первой?» — поинтересовался Минковский. — Ее траектория закончилась бы там же». Возможно, это замечание было вызвано его тогдашними размышлениями над траекториями в пространстве-времени. Так иногда математика находит самые неожиданные приложения. Вскоре Гильберт бросает лыжи, чтобы заняться велосипедом, который в те времена в Германии был тоже в новинку, и на время теряет интерес к электродинамике.

Минковского же этот предмет занимает все больше, особенно после того, как в 1906 г. он знакомится со статьей Пуанкаре о динамике электрона, которая его ошеломляет. Пуанкаре снова сделал нечто выдающееся.<sup>4</sup>

Минковский тут же бросается в погоню, но ему потребуются почти два года, чтобы сократить разрыв. Тем временем, Борн защищает диссертацию и возвращается в родной Бреслау, весь пропитанный идеями Минковского об относительности. Он первым наткнется на фундаментальную проблему, без решения которой нельзя будет дальше двигаться по лабиринтам пространства-времени.

## Лоренц в Америке

На последних страницах своей работы 1904 г., известной как *Versuch*, Лоренц поместил четыре таблицы данных, позволяющих сравнивать полученные в 1902 г. Кауфманом экспериментальные результаты с параметрами, вытекающими из его формулы для поперечной массы (которая, как считалось, только и имела значение в экспериментах). Кауфман пообещал ему сделать все возможное, чтобы повысить точность экспериментов и выполнил обещание. Но, увы, они принесли лишь огорчение. Кауфман 30 ноября 1905 г. сообщает Лоренцу, что его новые результаты лучше соответствуют предсказаниям теории Абрагама, чем теории «Лоренца-Эйнштейна».<sup>5</sup>

Лоренц в отчаянии. 8 марта 1906 г. он пишет из Лейдена Пуанкаре, который, тем временем, уже прислал ему свою статью *О динамике электрона*.

*«Мой дорогой и глубокоуважаемый коллега,*

*Не стоит и упоминать, что я прочел Вашу статью с огромным интересом и очень рад видеть, что мои выводы подтверждаются Вашими рассуждениями. [К сожалению,] моя гипотеза [...] противоречит результатам новых экспериментов Кауфмана. [...] Я не представляю, что теперь делать». [Признавшись в своем бессилии, он умоляет Пуанкаре о помощи.] Я был бы счастлив, если бы Вы могли разрешить некоторые вновь возникшие затруднения».*<sup>6</sup>

Засим он покидает Лейден, чтобы впервые в жизни отправиться в США для чтения курса лекций в Колумбийском университете Нью-Йорка.

В апреле в Нью-Йорке он объясняет студентам «... понятия “эффективных координат”, “эффективного времени” и т.п., которые мы использовали для представления наших результатов и для весьма интересного истолкования этих результатов, предложенного Эйнштейном. Теория Эйнштейна обладает явным преимуществом перед моей: тогда как мне не удалось получить уравнения, имеющие тот же вид после преобразования, что и до него, Эйнштейн получил этот результат, используя систему переменных, слегка отличающуюся от моей». После чего он произносит примечательную фразу: «Я не использовал подстановки Эйнштейна, поскольку его формулы довольно сложны [но ведь формулы Эйнштейна идентичны его формулам!] и представляются несколько искусственными, хотя и выведены из самого принципа относительности».<sup>7</sup>

## Пуанкаре раздосадован

Не только немецкие физики приложили руку к тому, чтобы навредить репутации Пуанкаре. 16 марта 1907 г. в Париже при весьма драматических обстоятельствах в возрасте восьмидесяти лет скончался прославленный химик, неперенный секретарь Академии наук Марселен Бертело (1827–1907). Он провел всю ночь рядом с телом только что умершей жены, страдавшей неизлечимой болезнью сердца, а потом вышел в соседнюю комнату, прилег, закрыл глаза и скончался.

Спустя несколько дней Пуанкаре получил предложение занять освободившийся пост неперенного секретаря Академии наук, а также место Бертело во Французской академии,<sup>\*</sup> куда тот был избран в 1901 г.

<sup>\*</sup> Научное учреждение во Франции, задачей которого является изучение французских языка и литературы и формирование языковой и литературной нормы французского языка. — (прим. перев.)

Но не тут то было! Согласно непоколебимой традиции, хотя бы один из непременных секретарей Академии наук должен был быть академиком по секции «физических наук». Пуанкаре ясно дали понять, что академики-физики не считают его своим! 10 мая он сообщил свое решение: «Академия разделилась на две фракции. . . я не хотел бы быть избранным небольшим большинством, дав основания считать, что мои коллеги из секции физических наук в своей массе выступили против меня. . . В данной ситуации я полностью снимаю свою кандидатуру».

«Затесавшийся среди химиков физик» Анри Луи Лешателье (1850–1936) писал Пуанкаре: «С одной стороны, мы хотели сохранить за физическими науками принадлежащее им в Академии место, а с другой стороны, мы пытались не обидеть Вас отказом. . . » и т.п. По иронии судьбы, избранный вместо Пуанкаре Альбер-Огюст Кошон де Лапаран (1839–1908), как и Пуанкаре учился в Политехнической школе, потом в Горном институте, после чего создал себе солидную репутацию в физической географии, где Пуанкаре тоже был не из последних!

В знак признательности за то, что Пуанкаре уступил ему свое место, Лапаран обещал оказать тому всяческую поддержку для избрания во Французскую академию: «Завтра в два часа дня, — обещал он, — я буду как штык у дверей Академии». Но это было ни к чему. Пуанкаре не мог занять место Бертелло.

Если бы не это досадное происшествие, то возможно, его назначения состоялись бы и Пуанкаре смог бы противостоять нападкам с другого берега Рейна, нападкам, которые навсегда лишили его принадлежащих ему заслуг в создании двумя годами ранее теории относительности.

## Обзор состояния дел. . . но не совсем полный

В 1907 г. физик Йоханнес Штарк (1874–1957), будущий Нобелевский лауреат 1919 года, решает опубликовать в редактируемом им журнале *Jahrbuch*, специализирующемся на радиоактивности и электричестве, обзор состояния дел в теории относительности: в чем ее суть? Каковы основные посвященные ей публикации?

Он просит Эйнштейна написать такой обзор. Эйнштейн отвечает: «Я был бы очень рад выполнить Вашу просьбу. [ . . . ] К сожалению, я не в курсе всего, что написано на данную тему, так как в мое свободное время библиотека закрыта. Помимо своих статей, я знаком с работой Лоренца (1904 г.), одной статьей Кона, одной работой Мозенгейля и двумя статьями Планка. Я был бы очень благодарен, если бы Вы указали мне другие относящиеся к данной теме публикации, если они Вам известны».<sup>8</sup>

Так начался обмен письмами, дружеский и вежливый поначалу, но постепенно приобретший весьма язвительный тон.

В ответном письме от 4 октября Штарк привлекает внимание Эйнштейна к только что опубликованной работе Планка *О динамике движущихся систем*, в которой в явном виде фигурирует выражение  $m = E/c^2$ , что эквивалентно  $E = mc^2$ , и уведомляет о намерении написать собственный комментарий к этому уравнению. 17 февраля следующего 1908 года, простуженный и разгневанный Эйнштейн, ознакомившись с опубликованным к тому времени комментарием Штарка, пишет тому, что находит странным отсутствие признания его приоритета в установлении соотношения между



инерцией и энергией. Штарк сразу же отвечает: «Я истолковал Вашу статью, как указывающую лишь на то, что испускание энергии приводит к изменению кажущейся массы. [...] Формула Планка  $m = E/c^2$  представлялась новаторской и радикальной по своему подходу. Однако, перечитав Вашу статью в *Jahrbuch* и дополнительно поразмыслив об указанном соотношении, я, конечно, осознал, что выводы Планка основываются на Вашей статье».<sup>9</sup>

Но вернемся к обзору Эйнштейна для *Jahrbuch*. Он принялся за работу, изучая литературу и лично общаясь с несколькими молодыми учеными, двое из которых — ученик Планка Макс фон Лауэ (1879–1960) и Якоб Лауб (1872–1962) станут его друзьями. 4 декабря он отправляет Штарку обещанный обзор.<sup>10</sup>

Мы никогда не узнаем, знал ли тогда Эйнштейн о работе Пуанкаре и не решил ли намеренно обойти молчанием ее положения и результаты. Как бы то ни было, в обзоре она не упоминается. Он не говорит читателю, что преобразования Лоренца образуют группу, что эта группа определяет геометрию четырехмерного пространства, что бесконечно малые преобразования позволяют уточнить структуру этой группы, не указывает он и что является инвариантами группы и т.п. Одним словом, он не приводит ничего из математических основ новой механики, созданной Пуанкаре. Он строго придерживается представления собственной аксиоматики местного времени, введенной в 1905 г. Эйнштейн заявляет: «Однако неожиданно оказалось, что необходимо лишь достаточно точно сформулировать понятие времени, чтобы обойти только что изложенную трудность. Следовало лишь понять, что введенную Г.А. Лоренцом вспомогательную величину, названную им “местным временем”, на самом деле следует определить как “время”».

Далее он поясняет: «С таким определением времени основные уравнения теории Лоренца будут удовлетворять принципу относительности, если заменить [...] преобразования другими уравнениями, соответствующими новому понятию времени. [...] ...Представление об эфире как носителе электрических и магнитных сил не находит места в излагаемой здесь теории; напротив, электромагнитные поля оказываются здесь не состояниями некоторой материи, а самостоятельно существующими объектами, имеющими одинаковую природу с весомой материей и обладающими вместе с ней свойством инерции». Одним словом, местное время становится просто временем, а эфир заменяется электромагнитным полем. Что же до вопросов, то они по-прежнему остаются.

В этой статье, которую Эйнштейн называет «лишь попыткой свести в единое целое работы, которые возникли до настоящего времени путем объединения теории Лоренца и принципа относительности», он упоминает работы Майкельсона и Морли, Абрагама, Лоренца, Кауфмана, Бухерера, Планка (упомянутого три раза), но не Пуанкаре. Как полагает Абрахам Пайс, «ни Эйнштейн, ни Штарк не были знакомы с пространной работой Пуанкаре, посвященной теории относительности», добавив при этом, что эта работа уже должна была быть достаточно известна «к декабрю 1907 г.,

когда Эйнштейн заканчивал свою обзорную статью, и тем более, к марту 1908 г., когда он внес в нее некоторые поправки и добавления». <sup>11\*</sup>

### «Счастливейшая мысль в моей жизни»

Работая над статьей для *Jahrbuch* Штарка, Эйнштейн задается новыми вопросами. Отмечая, что «до сих пор мы применяли принцип относительности, т.е. требование независимости законов природы от состояния движения системы отсчета, только к неускоренным системам отсчета», он спрашивает «можно ли представить себе, что принцип относительности выполняется и для систем, движущихся относительно друг друга с ускорением?» <sup>12</sup>

Внезапно все становится ясно. «Я сидел в Патентном бюро, когда мне в голову пришла “счастливейшая мысль в моей жизни”», — рассказывал он позднее. <sup>13</sup>

Эта очень простая мысль, что «в свободном падении человек не ощущает своего веса», произвела на него «глубокое впечатление» и в конце концов привела к формулировке новой теории тяготения. Намек на это содержится уже в статье для *Jahrbuch*: «в дальнейшем мы будем предполагать полную физическую равноценность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета».

*Полную физическую равноценность...* На смену этим впервые произнесенным словам спустя пять лет придет «гипотеза эквивалентности», а затем появится и окончательно принятое наименование «принцип эквивалентности». <sup>14</sup>

Эта «счастливейшая мысль» интересна с двух точек зрения: во-первых, тем, что она побудила Эйнштейна заняться поиском теории тяготения и легла в ее основу, а во-вторых и прежде всего, тем, что она явилась основной причиной трудностей, с которыми он столкнулся при создании этой новой теории.

Остановимся на минутку на двух ключевых словах статьи из *Jahrbuch*: Эйнштейн не претендует на рассмотрение с помощью своей гипотезы *любого* поля тяготения. Он, напротив, в явном виде ограничивается лишь рассмотрением *статического* <sup>15</sup> гравитационного поля, то есть такого, которое не изменяется во времени. Это очень существенное ограничение: он рассматривает лишь простейший случай. Цель применения его гипотезы двояка: «распространить принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолинейного движения системы отсчета» и «заменить однородное поле тяжести равномерно ускоренной системой отсчета, которая до известной степени поддается теоретическому рассмотрению».

Но это не все — под влиянием своей идеи Эйнштейн ставит под сомнение один из двух принципов, положенных им в основу аксиоматического подхода к местному времени. По его новому представлению, скорость света более не постоянна, но меняется по мере прохождения света в поле тяготения, что вызывает, как он отмечает в конце работы, в § 18, неожиданные и непонятные последствия.

\* Любопытно, что автор не цитирует следующую за этим фразу А. Пайса: «Тем не менее, в особенности с учетом переписки между Эйнштейном и Штарком, я не вижу оснований считать, что в 1907 г. Эйнштейн был знаком с работой Пуанкаре и решил ее игнорировать». — (прим. перев.)

Прибегнув снова к «твердым стержням» и «синхронизованным часам» для измерения «обычным способом» расстояний и длительностей, он рассматривает систему  $\Sigma$ , ускоренно движущуюся по отношению к покоящейся системе  $S$  и уточняет: «Совокупность показаний поставленных таким образом часов мы будем называть “местным временем”  $\sigma$  системы отсчета  $S$ .\* Физический смысл местного времени, как это непосредственно видно, заключается в следующем».

Есть ли это просто «время»? Нет! «Местное время  $\sigma$  непосредственно нельзя считать «временем» системы отсчета  $S$ , и именно по той причине, что два точечных события, происходящие в разных точках  $S$ , в смысле нашего определения неодновременны, когда их местные времена равны». Поэтому он определяет другое «время»  $\tau$  в системе  $\Sigma$  «как совокупность показаний часов, находящихся в начале координат системы отсчета  $\Sigma$ ».

А как соотносятся  $\sigma$  и  $\tau$ ? Если  $a$  есть равномерное ускорение, сообщенное системе  $\Sigma$  (в направлении  $x$ ), и если  $x$  есть положение рассматриваемой точки, то  $\sigma = \tau(1 + ax/c^2)$ , при условии достаточной близости к началу координат, то есть если  $x$  не очень велико.

Итак, у нас есть два определения времени для  $S$ . Какое из них выбрать?

Это зависит: «[если мы хотим измерять свойства системы в различных местах поля тяготения], естественно использовать “местное время”  $\sigma$ . [Если же мы хотим наблюдать некое явление, в которое одновременно вовлечены несколько объектов в различных местах поля тяготения], мы должны использовать время  $\tau$ ».

Какой же отсюда следует вывод? «Поскольку при определении времени  $\tau$  используются моменты времени по часам, находящимся в некотором произвольно выбранном месте, то при пользовании временем  $\tau$  законы природы могут зависеть от координат».

После публикации этой работы в *Jahrbuch* Эйнштейн берет паузу: в следующий раз он обратится к тяготению три с половиной года спустя, летом 1911 года.

## **Эйнштейн? Как же, помню!**

Спустя два года среди студентов немецких университетов поползли слухи: долгожданная революция наконец свершилась и у нее есть название — принцип относительности, хотя кто за ней стоит пока неясно.

*Принцип относительности!* Все пытаются дознаться, что же это такое. Из уст в уста передается: «Прочтите статью Эйнштейна. . . Кого-кого? Эйнштейна, он напечатался в *Annalen der Physik*». Статью читают и находят в ней незаметную фразу в скобках: «. . . содержание которого в дальнейшем будет называться «принципом относительности».

*Prinzip de Relativität?* Почему такое типично французское построение термина? Давайте же переименуем его на немецкий лад (не задавая притом бестактных вопросов) — *Relativitätsprinzip*, разве так не лучше звучит?<sup>16</sup>

Итак, панацея найдена — это *Relativitätsprinzip*. Приват-доцент Берлинского университета Макс Бернхард Вайнштайн доходит до того, что объявляет об «одном из самых великих переворотов в наших взглядах за всю историю». В ход идут самые громкие слова. Густав Ми: «Полный переворот».

\* Для обозначения систем отсчета автор использует символы, отличные от тех, которые употребляются в работе Эйнштейна. — (прим. перев.)

Ханс Витте: «Переворот во взглядах». Разве не отвечает новый принцип благоговейной надежде Феликса Хаусдорфа: «Настоящее надеется сформировать единый взгляд на мир, в рамках которого объединятся разрозненные фрагменты знаний, образуя единую и цельную систему»?

Слух о статье Эйнштейна достигает и Геттингена. Минковский поражен: «Эйнштейн? Как же, помню, он вечно прогуливал мои лекции. Никогда бы не подумал, что он на такое способен».<sup>17</sup> Будучи проездом в Цюрихе, он решает поприветствовать своего бывшего студента.

Он пишет 6 октября: *«Мы собираемся обсудить Ваши статьи, опубликованные в Ann. d. Phys. и в Ch. Vol. 17 на нашем еженедельном семинаре. Я был бы признателен, если бы Вы предоставили мне их оттиски. Я недавно побывал в Цюрихе и с удовольствием отметил тот интерес, который вызвали Ваши статьи в самых широких кругах. Искренне Ваш, Г. Минковский»*.

Для Эйнштейна это было как благословение. Математик, причем один из величайших — сам Минковский, наконец заметил его работу! Какой реванш за все потерянные годы...

Спустя месяц, 5 ноября 1907 года, Минковский выступает на семинаре студентов-матфизиков с докладом «Принцип относительности». Неоднократно упоминая Пуанкаре, он утверждает, что нашел «симметрии в физических уравнениях, которые ускользнули даже от самого Пуанкаре». Затем он оформляет этот доклад в виде статьи, направленной в Императорское научное общество Геттингена 21 декабря. Однако, в этой статье имя Пуанкаре фигурирует лишь дважды...<sup>18</sup> Утаивание роли французского математика становится ощутимым.

Но вернемся к Эйнштейну. Растущая известность начинает создавать ему проблемы и он обращается за помощью к профессору математики Мюнхенского университета Арнольду Зоммерфельду, проявлявшему значительный интерес к теории относительности. Эйнштейн пишет ему 14 января 1908 года: «Я вынужден начать это письмо с личной просьбы. С тех пор, как мне посчастливилось ввести в физику принцип относительности, Вы (как и многие другие) переоценили мои научные способности в такой степени, что я испытываю неловкость [...] Позвольте заверить Вас, что если бы я был в Мюнхене и имел достаточно времени, я с огромным удовольствием прослушал бы Ваши лекции, чтобы усовершенствоваться в математической физике».<sup>19</sup>

«С тех пор, как мне посчастливилось...» Но захотят ли услышать это искреннее признание? Машина, создающая и уничтожающая репутации, уже запущена на полный ход...

## Тревожный звоночек

В 1908 году, 6 апреля, Пуанкаре поездом прибывает в Рим, где он должен выступить на IV Международном конгрессе математиков с докладом «Будущее математики». Все великие математики — Леви-Чивита,<sup>20</sup> Клейн, Гильберт, Лоренц, даже Абрагам — уже в Риме и ждут его доклада. Но в гостинице Пуанкаре настигает приступ и его срочно отвозят в больницу, где оперируют на простате. Доклад на конгрессе за Пуанкаре читает его друг геометр Гастон Дарбу.

В ходе конгресса, Леви-Чивита под большим впечатлением от прочитанного Абрагамом доклада о «Теории электронов» (а равно от него самого, которого он находит «блестящим и приятным в общении»), предлагает ему должность экстраординарного профессора в Высшем техническом институте Милана, где ему предстоит читать лекции по разделу «Рациональной механики», как она тогда называлась. Мы еще встретимся с Абрагамом и его ментором чуть позже, когда они, спустя несколько лет, столкнутся с Эйнштейном по некоторым техническим деталям общей теории относительности.

По возвращении в Париж Пуанкаре постепенно возвращается к обычной деятельности, но звоночек уже прозвенел. Вскоре римские неприятности повторяются и усугубляются, но Пуанкаре не обращает на это внимания.

7 сентября физик Альфред Бухерер (1863–1927) сообщает Эйнштейну, что ему удалось в результате «тщательно проведенных экспериментов» по зависимости массы от скорости установить «без всякого сомнения, справедливость принципа относительности». Еще через два дня он подтверждает, что «все в порядке» [...] Доказательство совершенно неопровержимо. [...] «Теория Эйнштейна–Лоренца подтверждена».<sup>21</sup> Он, однако, неправ, поскольку формула Эйнштейна для зависимости массы от скорости ошибочна. Тем не менее, он представляет свои результаты в докладе «Экспериментальное подтверждение теории Лоренца–Эйнштейна».<sup>22</sup> По иронии судьбы, через несколько лет выяснится, что фильтры, которые Бухерер использовал для разделения электронов по скоростям, были дефектными, а потому его результаты ничего не доказывали. . .

## *Пространство и время*

В Геттингене Герман Минковский метал громы и молнии, а его галльские усики придавали ему еще более воинственный вид. У него в руках статьи и Пуанкаре, и Эйнштейна, опубликованные в 1905 г. Он понимает, что он, возможно, единственный, кто прочитал статью Пуанкаре. Он также понимает, что он единственный знает о том, что он это знает. . .

Минковский озабочен — по непонятной причине его верный друг Давид Гильберт стал очень нервным и подавленным. Состояние Гильберта ухудшается и он решает взять вынужденный отпуск и отправиться в санаторий в горы Гарца, в воспетое в мифах место, куда по легенде каждый год слетаются ведьмы, чтобы отпраздновать Вальпургиеву ночь. Там же приходил в себя после своей «дуэли» с Пуанкаре и Клейн!

В такой достаточно тревожной обстановке Минковский произносит перед собранием немецких натуралистов и врачей речь, озаглавленную *Пространство и время*, которая и сделала его знаменитым.<sup>23</sup>

Речь начинается блестяще: «Взгляды на пространство и время, которые я собираюсь изложить, основаны на результатах экспериментальной физики, и в этом их сила. Взгляды эти радикальны. Отныне пространство само по себе и время само по себе уходят в мир теней, и сохраняет реальность лишь их своеобразный союз. Вначале я хотел бы показать, как следуя чисто математическим рассуждениям, возможно прийти к новым представлениям о пространстве и времени».

Следуя *чисто математическим рассуждениям*? Тогда он должен обязательно говорить о работах Пуанкаре. . . Но нет! Он отмечает, что уравне-

ния классической механики инвариантны вдвойне: с одной стороны, при изменении положения, с другой стороны, при приведении системы координат в прямолинейное и равномерное движение. Более того, начальное положение временной координаты не играет в этих уравнениях никакой роли: «Мы привыкли считать аксиомы геометрии “заданными раз и навсегда и в окончательном виде”. Не потому ли упомянутые выше два вида инвариантности очень редко встречаются в одной фразе».

Кажется, что мы читаем Пуанкаре. Это впечатление становится неодолимым, когда Минковский переходит к теории групп: «Каждый из двух видов инвариантности представляет [...] определенную группу преобразований. Первая группа считается фундаментальной характеристикой пространства. Ко второй группе обычно относятся с пренебрежением, что позволяет использовать ее, не беспокоясь более о том, что пространство, полагавшееся неподвижным, может и само находиться в состоянии равномерного движения. Одним словом, каждая из групп существует бок о бок с другой, но независимо. Их очевидно разнородный характер, видимо, не поощрял попыток их объединения. Однако, именно объединение этих двух групп приводит к полной группе, анализ которой и наводит на размышления».

В этот решающий момент выступления Минковский упоминает о введении Лоренцом понятия местного времени: «Лоренц использовал физическую модель местного времени для лучшего понимания сокращения размеров. Но заслуга первым ясного осознания того, что время, введенное для одного электрона, может быть точно так же введено и для другого [...] принадлежит Эйнштейну». И затем сообщает: «Но ни Эйнштейн, ни Лоренц не рассмотрели [более трудного] понятия пространства. А ведь в результате смелого чисто математического подхода можно было бы обнаружить для пространства те же особенности, что и для времени».

*В результате смелого чисто математического подхода? Уж здесь-то Минковский точно должно говорить о Пуанкаре...*

Но снова нет! «Сделать такой шаг, — продолжает он, — необходимо. Этот постулат по сути означает, что в природных явлениях реализуется лишь четырехмерное пространство [введенное Пуанкаре!], хотя проекция такого пространства на наши привычные четыре измерения [три пространственных и одно временное] также сохраняет определенную правомерность».

Провидец Минковский называет четырехмерное пространство Пуанкаре «Вселенной», точки в этом мире «событиями», переименовывает постулат относительности в «постулат Вселенной» и даже говорит о *Traktors*, которые теперь называют тензорами.

Вся четвертая часть его речи есть по сути монумент прозорливости Пуанкаре. Минковский показывает, что можно извлечь из «квадратичной формы» [введенной Пуанкаре!]. Он полагает  $s = t\sqrt{-1}$  и отмечает, что квадрат бесконечно малого расстояния между двумя близкими точками четырехмерной Вселенной записывается как  $dx^2 + dy^2 + dz^2 + ds^2$  «абсолютно симметричным выражением относительно  $x, y, z$  и  $s$ , с симметрией, свойственной всем законам природы, не противоречащим постулату Вселенной».

Он добавляет: «Суть этого постулата можно красочно математически выразить загадочной формулой  $3 \cdot 10^5 \text{ км} = \sqrt{-1} \text{ сек}$ ». Эта формула нам просто говорит, что секунде времени соответствуют примерно 300,000 км пространства, а символ  $\sqrt{-1}$  напоминает, что в четырехмерном пространстве координата времени мнимая.

## Планы на будущее...

Минковский дышит здоровьем. На следующий день после своего выступления он говорит присутствовавшему на нем Макс Борну: «Я подготовил математический арсенал, необходимый для дальнейшего развития теории относительности. Прочтите все это, и когда будете готовы, приезжайте в Геттинген — будем работать вместе». Борн забирает с собой пачку бумаг,<sup>24</sup> и в конце декабря он готов работать.

В четверг 7 января 1909 г. Минковский вместе со своими друзьями Гурвицем и Гильбертом отправляется на еженедельную прогулку в Керотель, а на следующий день председательствует в Геттингене на защите диссертации. В воскресенье с ним случается внезапный приступ острого аппендицита, и через два дня он умирает в больнице, едва успев попрощаться с собравшимися у одра друзьями. Он только что отметил свое сорокапятилетие. Вдова Минковского просит Борна, как самого последнего и самого лучшего ученика, разобрать его бумаги. Борн находит среди них незаконченный расчет электромагнитной массы электрона... заканчивает его и публикует. Фогт тут же предлагает ему пост приват-доцента в руководимом им институте теоретической физики.

Мы никогда не узнаем, что сделал бы Минковский, если бы остался жить. Но я тем менее предпочитаю считать последнюю фразу его выступления скрытым признанием заслуг Пуанкаре: «Математическая разработка [новой динамики в пространстве-времени] должна умиротворить даже самых яростных противников и заставить их признать неразрывную связь чистой математики с физикой».<sup>25</sup>

По иронии судьбы, со времен политехникума Эйнштейн считал Минковского всего лишь одним из специалистов по «возвышенной математике», к которым относился с недоверием.

Прочитав речь *Пространство и время*, Эйнштейн пожал плечами и назвал ее «излишней ученостью». Спустя шесть лет в том же духе он писал своему другу Бессо: «Речь Минковского тебе не поможет. Его работы чрезмерно усложнены».<sup>26</sup>

## Пуанкаре в Геттингене

Вскоре после кончины Минковского выполняется завещание другого математика, Пауля Вольфскеля (1856–1906), умершего двумя годами раньше в Дармштадте, в 250 километрах к юго-западу от Геттингена. Он завещал премию в сто тысяч марок тому, кто первым даст полное доказательство «Последней теоремы» Ферма.<sup>27</sup> В завещании также указывалось, что проценты от этой суммы могут использоваться специальным комитетом Научного общества Геттингена по его усмотрению. Председателем комитета в то время был Давид Гильберт, и он тут же решает пригласить на эти деньги Пуанкаре.

Спустя три месяца после кончины Минковского Пуанкаре приезжает в Геттинген, чтобы прочесть, причем на немецком, серию лекций. Как жаль, что они не встретились! Можно только воображать, о чем бы они говорили — два математика, один из которых создал пространство-время, а другой — структуру Вселенной!

Встретили Пуанкаре очень тепло.<sup>28</sup> Гильберт взял его под руку и называл «мой дорогой друг». Но, как позже рассказывал новый ассистент Гильберта Рихард Курант, откомандированный сопровождать Пуанкаре, «особого сближения не произошло, ничего подобного на отношения Гильберта и Минковского не было». Эти двое были действительно близкими друзьями.

В первые шесть дней Пуанкаре читает (на языке Гёте) лекции по «различным вопросам анализа, математической физики, теоретической астрономии и философии математики».<sup>29</sup> В последний день, на этот раз на языке Мольера, он читает лекцию «Новая механика».<sup>30</sup> Выступая перед математиками, Пуанкаре тем не менее совсем не пользовался уравнениями, не вводил математических символов, что не помешало ему просто и понятно изложить весьма важные вещи. Например:

«Массу можно определить двумя способами: 1) как частное от деления силы на ускорение — это есть истинное определение массы как меры инерции тела; 2) через притяжение, испытываемое телами в согласии с законом Ньютона. Таким образом, следует проводить различие между массой как коэффициентом инерции и массой как коэффициентом притяжения. Согласно закону Ньютона, между обоими коэффициентами должна быть строгая пропорциональность. Это однако продемонстрировано лишь для скоростей, к которым применимы общие принципы динамики».

Затем он обращается к опытам ученых Геттингена — Кауфмана и Абрагама, оба они присутствуют на лекции. «[Теперь известно], что масса-коэффициент инерции возрастает со скоростью. Следует ли из этого заключить, что масса-коэффициент притяжения также растет со скоростью?»

Он показывает, к каким трудностям это приводит: «Если коэффициент притяжения зависит от скорости, то поскольку скорости двух взаимно притягивающих тел в общем случае не одинаковы, как такой коэффициент будет зависеть от этих двух скоростей?»

Вопрос задан — и какой вопрос! Ответа он ждет до сих пор.<sup>31</sup>

В заключение, Пуанкаре вновь обращается к астрономии: «Рассматривая закон притяжения, мы легко увидим, что различие между двумя механиками [ньютоновой и “новой”, т.е. его механикой!] будет тем больше, чем больше скорости планет. Если такое различие вообще можно обнаружить, то наибольшим оно должно быть у Меркурия, поскольку он обладает наибольшей из всех планет скоростью».

Он повторяет свою пророческую убежденность в том, что смещение перигелия Меркурия дает наилучший шанс подтвердить превосходство новой механики над старой «даже если те, кто сначала основательно не изучат старую механику, не смогут понять новую».

Ни в подобной лекции, прочитанной в Лилле 3 августа на заседании Французской ассоциации содействия наукам, ни в лекции в Берлинском университете, прочитанной на французском 14 октября следующего года в ходе конференции, посвященной вопросам относительности, как отмечают историки науки, Пуанкаре ни разу не упомянул Эйнштейна. Не будем даже пытаться вообразить, как относился к нему Пуанкаре.

\* \* \* \* \*



## Примечания

<sup>1</sup>См., например, Poincaré H., *Sur la détermination des orbites par la méthode de Laplace*, Bulletin astronomique de l'Observatoire de Paris, t. XXIII, май 1906 г., p. 161.

<sup>2</sup>Минковский читал лекции не только по физике. Он читал также и «чистую» математику, в частности, теорию чисел — один из его любимых разделов (в молодости он написал замечательную работу *Геометрия чисел*).

<sup>3</sup>Reid C., *Hilbert*, op. cit., p. 106.

<sup>4</sup>Напомню, что в апреле предыдущего года именно Пуанкаре, а не Гильберт удостоился премии Бойяи Академии наук Венгрии. Бывший членом жюри Клейн по этому поводу сказал: «Пуанкаре полностью заслужил премию. Он владеет практически всей математикой. Но не будем расстраиваться, скоро придет черед и Гильберта». Reid C., *ibid.* p. 108.

<sup>5</sup>Kaufmann W., *Annalen der Physik*, vol. XIX, p. 487.

<sup>6</sup>Lorentz H.A., «Письмо Анри Пуанкаре», 8 марта 1906 г., его факсимиле приводится в A.I. Miller, *Frontiers of Physics*, op. cit., p. 83.

<sup>7</sup>Lorentz H.A., *Leçons données à l'université Columbia en 1906*, § 189, Leipzig, Teubner, 1916.

<sup>8</sup>Einstein A., *The Collected Papers*, op. cit., vol. V, doc. 58. См. также А. Пайс, *Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*, стр. 159.

<sup>9</sup>*Ibid.*, doc. 87.

<sup>10</sup>Озаглавлен *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen (О принципе относительности и его следствиях)*, Собрание научных трудов Эйнштейна, том I, стр. 65). Отметим, что в заголовке присутствует слово *Relativitätsprinzip*, а не *Relativitätstheorie*, которое Эйнштейн начнет использовать позднее.

<sup>11</sup>Pais A., *Subtle is the Lord...*, op. cit., p. 165 (А. Пайс, *Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*, стр. 159). В 1913 г. Эйнштейн публикует популярную статью для сборника *Принцип относительности*. Этот сборник много раз переиздавался и переводился на несколько языков. В нем собрано 11 статей по теории относительности, опубликованных в период 1895–1918 гг. (в том числе статья математика Германа Вейля). Пайс отмечает: «У этого сборника два недостатка: во-первых, там нет ни одной работы Пуанкаре. [...] Там можно было бы легко поместить отрывок работы *О динамике электрона*, тем более, что работа Лоренца была там помещена целиком [...]».

<sup>12</sup>Einstein A., *Jahrbuch der Radioaktivität und Electrinik*, vol. IV, 1907, p. 411; Собрание научных трудов Эйнштейна, том I, с. 105.

<sup>13</sup>По рассказу Юна Ишивары, Einsten Koën-Roku, Tokyo-Tosho, 1977. См. также А. Пайс, *Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*, с. 171.

<sup>14</sup>Здесь речь будет идти о принципе эквивалентности в его исходном виде 1907 года. Эйнштейн позднее неоднократно изменял как форму, так и содержание этого принципа.

<sup>15</sup>Хотя Эйнштейн в своей работе употребляет применительно к полю тяготения прилагательное «однородное», из всего контекста ясно, что его нужно переводить как «статическое». Во избежание путаницы, мы будем в дальнейшем во всех приводимых цитатах использовать слово «статическое».

<sup>16</sup>Среди тех, кто сразу заинтересовался этой проблемой, были три физика, не входивших в геттингенскую группу. Макс Планк был одним из первых; он установил, что его квант действия, равно как и принцип наименьшего действия, есть инвариант относительно преобразований Лоренца, что позволило ему заключить: «Очевидно, что вследствие этой теоремы, значение принципа наименьшего действия может быть развито в совершенно новом направлении» (Planck, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, vol. IV, 1906, p. 136). Примерно в то же время, его ассистент Макс фон Лауэ, возвращаясь из похода в Альпы, посещает в Берне Эйнштейна. После встречи он пишет: «Встретивший меня в Патентном бюро молодой человек произвел очень неожиданное впечатление. Я не мог поверить тому, что разговариваю с создателем теории относительности» (Seelig C., *Einstein, Leben und Werk eines Genies unserer Zeit*, Europa Verlag, 1960, p. 130. См. также А. Пайс, *Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*, стр. 147). Упомянем также Пауля Эренфеста, который как и фон Лауэ, стал ближайшим другом Эйнштейна. В 1907 г. Эренфест поднимает деликатный вопрос: как применять преобразования Лоренца к «твердому телу»? Напомним, что без «твердых стержней» и речи не может идти о «теории относительности Эйнштейна»!

<sup>17</sup>Reid C., *Hilbert*, op. cit., p. 105. Будучи студентом Цюрихского политехникума, Эйнштейн записался на восемь курсов лекций Минковского. Он их охотно прогуливал, надеясь на конспекты своего друга Марселя Гроссмана. Минковский считал недостаточной

полученную Эйнштейном подготовку по математике. *Hilfsmittel, Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen*, Math. Arch., 60, 4.

<sup>18</sup>Minkowski H., *Göttinger Nachrichten*, 1908, p. 53.

<sup>19</sup>Письмо Эйнштейна Зоммерфельду, 14 января 1908 г. *The Collected Papers*, op. cit., vol. V, doc. 73. Как и Гильберт, выходец из Кенигсберга, Арнольд Зоммерфельд (1868–1951) был ассистентом Клейна в Геттингене, а затем получил должность профессора в Аахене. В 1906 г. он переехал в Мюнхен руководить специально созданным для него институтом. Он одним из первых заинтересовался теорией относительности, и в конце концов, хотя и не сразу, проникся к Эйнштейну сначала уважением, а затем и восхищением.

<sup>20</sup>Туллио Леви-Чивита (1873–1941) — выдающийся итальянский математик, член знаменитой Академии «рыси» (*Accademia dei Lincei*), образованной в Риме в 1603 г. и названной так потому, что ее членам предписывалось проникать в секреты наук «взглядом рыси». Там Галилей построил микроскоп и отправил его в 1612 г. в дар польскому королю Сигизмунду.

<sup>21</sup>Письма Бухерера Эйнштейну, 7 и 9 сентября 1908 г., *The Collected Papers*, op. cit., vol. V, doc. 117 и 119.

<sup>22</sup>Bucherer A., *Physikalische Zeitschrift*, vol. IX, 1908, p. 755.

<sup>23</sup>Minkowski H., *Göttinger Nachrichten*, 1908, p. 53.

<sup>24</sup>Reid C., *Hilbert*, op. cit., p. 113.

<sup>25</sup>Minkowski H., *Göttinger Nachrichten*, 1908, p. 53.

<sup>26</sup>Speziali P., *Albert Einstein, correspondance avec Michele Besso*, op. cit., 3 января 1916 г.

<sup>27</sup>Напомним формулировку этой теоремы: утверждается, что невозможно найти четыре целых числа  $a, b, c$  и  $n$ , для которых выполнялось бы равенство  $a^n + b^n = c^n$  при  $n$  большем двух. Для  $n = 2$  уравнение имеет решения, простейшим из которых является  $a = 3, b = 4, c = 5$ .

<sup>28</sup>Напомним, что в 1886 г. еще студентом Гильберт посетил Пуанкаре.

<sup>29</sup>*Sechs Vorträge über ausgewählte Gegenstände aus der reinen Mathematik und mathematischen Physik* — шесть лекций, прочитанных с 22 по 28 апреля 1909 г. в фонде Вольскеля Императорского научного общества Геттингена. Выбор тем несколько удивил и расстроил студентов математической группы, поскольку Пуанкаре осмелился обсуждать темы, которые они считали своей «собственностью», например, так называемые интегральные уравнения Фредхольма, названные по имени их открывателя Ивара Фредхольма (1866–1927), и бывшие в то время любимой темой Гильберта. Пуанкаре только-только тоже начал ими интересоваться, возможно, в преддверии визита в Геттинген. Его первое сообщение на эту тему относится к 21 декабря 1908 г. (*Note à l'Académie des sciences, Comptes rendus*, op. cit., t. 147, p. 1367).

<sup>30</sup>Текст этой лекции был переведен на немецкий и опубликован в 1910 г. под названием «Die neue Mechanik».

<sup>31</sup>Предложенная в 1905 г. Пуанкаре теория — одна из немногих, ставящих этот фундаментальный вопрос. Мы видели, что такой же вопрос возникает при поисках формулировки «точечного закона» в электродинамике.

## Эйнштейн в стране Маха

### Эйнштейну помогает последователь Маха

В 1909 г. Альфред Кляйнер добивается создания в Цюрихском университете кафедры теоретической физики, заведование которой он собирается отдать своему бывшему ученику Фридриху Адлеру. Узнавший об образовании новой кафедры Эйнштейн, решает предложить свою кандидатуру. «Будучи более философом, чем физиком, — рассказывает Жак Мерло-Понти, — Адлер видел в Эйнштейне и Герце создателей новых концепций в механике. Услышав о том, что его конкурентом был Эйнштейн, Адлер снял свою кандидатуру в его пользу».<sup>1</sup>

Кляйнер отправляется в Берн, чтобы поприсутствовать на лекциях, которые читает Эйнштейн, как частный преподаватель. У него всего два слушателя! Это Люсьен Шаван, старый член *Академии Олимпия*, и верный Мишель Бессо.

6 июля Эйнштейн заходит в кабинет своего начальника Халлера, директора Патентного бюро. Халлер чуть не падает от изумления: Эйнштейн, наверное, шутит. Как это он хочет уволиться? Почему? Разве что-то не так?

Все в порядке, отвечает Эйнштейн. Просто ему удалось получить место профессора в Цюрихском университете. Преподавательские качества Эйнштейна отнюдь не впечатлили Кляйнера, который прямо сказал тому, что они далеко не блестящи... Но это не помешало взять Эйнштейна в университет. Чтобы понять, что на самом деле произошло, нужно поближе познакомиться с личностью Фридриха Адлера.

Как он сам позднее упоминал, родился он в один год с Эйнштейном — в 1879 г. Рос он, как и Эйнштейн, в еврейской семье. Учился физике в Цюрихе, тоже как Эйнштейн. Женился на сокурснице — снова как Эйнштейн. Он был активным пацифистом — вскоре им также станет и Эйнштейн.

Но были и отличия — он был сыном Виктора Адлера. Старший Адлер родился в Вене в 1852 г. и в 1888 г. стал вдохновителем рабочих движений социал-демократической партии Австро-Венгрии, которая в ту пору противостояла популистской и антисемитской христианско-социалистической партии знаменитого мэра Вены Карла Люгера.<sup>2</sup> Борьба шла не на шутку, и сын решил полностью отдаться ей, оставив физику кому-нибудь другому, но отнюдь не кому попало. В идеале нужно было найти физика, predisposedного работать в направлении, указанном одним из друзей его отца... Виктор Адлер был, по сути, членом объединенного невидимыми узами братства — группы поклонников человека, который тогда считался почти легендарным. Этим человеком был Эрнст Мах. Для знакомства с ним вернемся чуть в прошлое.

В 1897 г., в самом начале дружбы с Бессо, Эйнштейну было семнадцать лет. Бессо, учившийся в Цюрихском политехникуме в 1891–1895 гг., познакомился там со «знаменитым словацким профессором» Аурелем Стодолой, специалистом по газовым и паровым турбинам, ставшим его ментором. Однажды Бессо пересказал Эйнштейну одну из историй, услышанных от Стодолы. Профессор Берлинского университета Христиан Поггендорф, автор знаменитой «Истории физики», несколькими годами раньше отказался опубликовать в редактируемом им журнале *Annalen der Physik* статью,

озаглавленную «Об определении массы», потому как счел ее чересчур революционной.

Автором статьи был уроженец Моравии (славянин, как и Стодола!) не кто иной, как Эрнст Мах (1838–1916). В течение более чем четверти века он руководил лабораторией экспериментальной физики в немецком университете Праги, а в 1895 г. возглавил специально созданную для него кафедру философии в Венском университете.

Еще в 1883 г. Мах опубликовал необыкновенную книгу «Механика» с подзаголовком «Историко-критический очерк её развития».<sup>3</sup> По совету Бессо Эйнштейн принялся за чтение «Механики»<sup>4</sup> Маха, которая произвела на него сильное впечатление. В течение долгих лет он будет считать себя убежденным махистом.

Адлер, отказываясь от места в пользу Эйнштейна, питал скрытую надежду, что тот окажется достойным продолжателем идей Маха.<sup>5</sup>

В Цюрихе для Эйнштейна начинается новая жизнь... На следующий день после назначения он уже в Женеве, где участвует в праздновании 150-летия университета, основанного Жаном Кальвином. За кулисами последователи Маха потихоньку помогают Эйнштейну. Вскоре растаял и сам старый лев — из своего логова в пригороде Вены Мах отправляет Эйнштейну подписанный экземпляр своей статьи, посвященной закону сохранения работы в механических системах.<sup>6</sup> Польщенный Эйнштейн тут же откликается письмом: «Глубокоуважаемый господин профессор! Я очень признателен Вам за присылку экземпляра труда о законе сохранения работы. [...] Вы оказываете столь сильное влияние на мировоззрение молодого поколения физиков, что даже самые ожесточенные Ваши нынешние противники в глазах физиков, царивших несколько десятков лет назад, выглядели бы «махистами»...<sup>7</sup> Мах ответил, что ему было приятно прочитать его работы по теории относительности...

В сентябре, немецкие математики, физики и врачи собрались в Зальцбурге. Эйнштейн, впервые участвующий в крупном научном съезде, приглашен в качестве почетного гостя Физического общества!<sup>8</sup> На заседании 21 сентября 1909 г. собрались все ведущие немецкие физики того времени — Планк, Циглер, Штарк, Рубенс, Зоммерфельд. Готовящийся к своему выступлению Эйнштейн, рассеянно ждет окончания других докладов, как вдруг его внимание привлекает к себе неизвестный докладчик — это некто Макс Борн, который отважно задает вопрос: можно ли на законных основаниях говорить о *твердых стержнях* в рамках теории относительности?<sup>9</sup>

Как помнит читатель, понятие о *твердых стержнях* есть одно из фундаментальных понятий, введенных Эйнштейном для построения своей аксиоматики местного времени. Макс Борн тут же объясняет, что о твердости в теории относительности можно говорить только в бесконечно малом масштабе, и приводит математический аппарат, который незадолго до кончины разработал для такого типа расчетов Минковский.<sup>10</sup>

Приходит очередь выступать Эйнштейну. Первая часть его выступления касается теории относительности. Он повторяет те же рассуждения, которые представляются ему фундаментом теории относительности: «На первый взгляд кажется, что невозможно примирить теорию электронов Лоренца с принципом относительности, но, тем не менее, сделать это можно» при условии использования твердых стержней и синхронизированных часов и т.д.<sup>11</sup>

После конференции Эйнштейн и Борн знакомятся, проникаются друг у другу симпатией и между ними возникает дружба, продолжавшаяся до конца дней.

Наибольшее впечатление встреча производит на Борна. Он даже приходит к убеждению, что Эйнштейн «уже вышел за пределы частной теории относительности и отдал ее пророкам рангом пониже, чтобы размышлять над новыми загадками природы [...]».<sup>12</sup>

На самом деле, Эйнштейн просто не мог поспевать за быстрым развитием математического аппарата четырехмерного пространства-времени, ему трудно было даже признать его существование. Эйнштейн тогда остановился у Зоммерфельда, сына врача, который помогал ему справиться с желудочным расстройством, вызванным возбуждением. Позднее Зоммерфельд, догадывавшийся об истинных причинах переживаний Эйнштейна, познакомил его с одним из своих студентов, Людвигом Хопфом (1884–1939), блестящим математиком, только что, в двадцать шесть лет, защитившим диссертацию. Эйнштейн тут же взял его к себе ассистентом, первым из целой плеяды математиков, к помощи которых он будет вынужден прибегать для решения непосильных для него задач *математической* физики.

По возвращении в Берн, который он вскоре оставит, Эйнштейн пишет Зоммерфельду, чтобы поблагодарить за оказанную помощь... и заодно рассеять его сомнения:<sup>13</sup> «Кстати, то недомогание было лишь незначительной болезнью желудка, от которой я излечился, как только заставил себя вести менее беспорядочную жизнь».<sup>14</sup>

Что касается выступления Борна, то оно не слишком обеспокоило Эйнштейна: «[...] оно основывается на подходе, подобном тому, который я использовал в своей недавно опубликованной в *Zeitschr. f. Radioactivitat* статье о системе, движущейся с постоянным ускорением».

## Новый сосед

Через несколько дней после зальцбургского конгресса Эйнштейн окончательно обосновывается в Цюрихе, где снимает квартиру прямо над квартирой Фридриха Адлера. Соседи подружились и стали регулярно встречаться на чердаке, чтобы «скрыться от своих чересчур активных сыновей». Адлер пишет родителям: «Чем больше я общаюсь с Эйнштейном, что происходит весьма часто, тем больше я убеждаюсь, что был прав на его счет».

Вот Эйнштейн и профессор, в обязанности которого входит читать вводный курс теоретической механики.

Теоретическая механика! Это была любимая тема великих математиков — Эйлера, Даламбера, Лагранжа, Лапласа, Гамильтона, Якоби и того же Пуанкаре, не говоря уж о Махе. Это трудная тема, которой Эйнштейн владел плохо.

Он начинает чтение курса 18 октября перед двадцатью студентами. Его заметки сохранились и занимают 116 страниц в издании, опубликованном Принстонским университетом в 1993 г.

Этот документ интересен с двух точек зрения. Во-первых, в нем чувствуется спонтанный дух революции — Эйнштейн излагает предмет как импровизацию и довольно беспорядочно. Во-вторых, он не преподает студентам математические основы предмета: он лишь вскользь упоминает принцип

Даламбера, уравнения Лагранжа, принцип Гамильтона, о которых он говорит, что они представляют «исторический интерес». Он обходит молчаливым теорию Гамильтона–Якоби и то, что вскоре послужит математической основой квантовой механики — уравнения канонических преобразований, «скобки» Пуассона, бесконечно малые преобразования, теореме Лиувилля, теорию «интегральных инвариантов» Пуанкаре...

После курса механики Эйнштейн читает в летний семестр 1910 г. кинетическую теорию газов, а затем, осенью, электричество и магнетизм. Но что-то там не заладилось, поскольку профессор Кляйнер пишет своему другу: «Эйнштейн знает, что не может рассчитывать на поддержку преподавательского состава после моих замечаний о его поведении [...] Я полагаю, что Вам следовало бы дождаться его отставки, прежде чем снова заняться этим вопросом».<sup>15</sup>

В такой враждебной атмосфере Эйнштейн однажды опарашивает всех, в том числе и жену, сообщением о своем переходе в пражский университет Карла–Фердинанда.<sup>16</sup> Он только что назначен там на самый высокий пост ординарного профессора теоретической физики. Что же происходило за кулисами?

## Эйнштейн в Праге

Если и есть в Европе город, выделяющийся из других своей интеллектуальной историей, то это Прага — город средневековья, город барокко, город университетский, «волшебная столица Европы», как называл Прагу Андре Бретон.\* Покидая в 1895 г. Немецкий университет Праги, Мах оставил там многочисленные измерительные приборы, построенные по его указаниям, а также... своих последователей. Одним из них был физик венгерского происхождения Антон Лампа, который поставил себе целью «пропагандировать идеи своего бывшего руководителя и находить новых сторонников». А кому было поручено найти наилучшего кандидата на вакантный пост? Конечно, Лампа!

Первым в списке кандидатов он поставил Эйнштейна (всего в списке было два имени; вторым был физик Густав Яуман, тоже принадлежавший к «махистам»). 24 сентября 1910 г. Эйнштейн потихоньку отправляется в Вену — в то время столицу всей монархии — где встречается со специально приехавшим Антоном Лампа, Виктором Адлером и... самим Махом. На следующий день, министр образования граф Карл фон Штюрк (не «махист» ли тоже?) подписывает приказ о назначении Эйнштейна.<sup>17</sup>

Семья Эйнштейнов прибывает в Прагу 7 апреля 1911 г. Через два месяца они получают письмо из Брюсселя. Письмо подписано уважаемым (и баснословно богатым) бельгийским промышленником Эрнестом Сольве и содержит приглашение принять участие в «Международном научном совещании для рассмотрения некоторых актуальных вопросов в области молекулярной теории и кинетики».<sup>18</sup>

«Честный малый», в прежнем смысле этого слова, и адепт науки, Сольве полагал, что создал теорию, способную все объяснить. Его друг, физик Вальтер Нернст (1864–1941), будущий Нобелевский лауреат по химии, убедил его организовать международный конгресс с участием знаменитых фи-

\* André Breton (1896–1966), известный французский писатель, поэт и эссеист, теоретик сюрреализма. — (прим. перев.)

зиков, перед которыми он мог бы изложить свои идеи. Нернст настоял на приглашении Эйнштейна, наряду с другими учеными, в том числе французами Анри Пуанкаре, Полем Ланжевеном и Марией Кюри.

Пожалуй, стоит процитировать несколько фраз из этого приглашения. Сольве пишет: «С энтузиазмом, вызванным появлением новых задач, и в надежде на углубление наших познаний о природе, я полагал бы, что письменный и устный обмен мнениями между исследователями, более или менее непосредственно занимающимися этими задачами, мог бы привести если не к окончательному решению, то, по крайней мере, к определению пути их решения на основе предварительного критического разбора».

Далее он уточняет: «Не будучи сам ученым-специалистом, я не могу глубоко заняться этими проблемами, однако поскольку я давно изучаю тяготение в общем плане с целью выявить его влияние на строение вещества и энергии, то позволю себе изложить свои соображения в краткой форме при открытии конгресса, в надежде, что некоторые из моих мыслей могли бы быть учтены в его работе».

И чтобы все стало окончательно ясно, он добавляет: «Желая обеспечить участие всех приглашенных, я предлагаю оплатить расходы участников в размере тысячи франков. С вопросами и за разъяснениями просьба обращаться к проф. В. Нернсту, Am Karlsbad 26a, Berlin W. 35».

Эйнштейну в Праге это приходится весьма кстати, поскольку, судя по всему, несмотря на упорный труд особых результатов пока нет.

Антон Лампа был не единственным оставшимся в Праге последователем Маха. Там же жил Георг Пик. Этот математик-новатор, чьи работы отличались замечательной краткостью, получил образование в Геттингене. Он был ассистентом Маха и сохранил о нем превосходные воспоминания. Пик, который был на двадцать лет старше Эйнштейна, с удовольствием делился с ним этими воспоминаниями во время ежедневных прогулок по университетскому саду. Пик стал подлинным духовным наставником Эйнштейна, которого он опекал, всячески помогал и даже постарался найти нового ассистента, молодого талантливого математика из Богемии Эмиля Ноэля.

Эйнштейн обзаводится новым кругом друзей: среди них писатель Макс Брод, готовящийся писать книгу *Путь Тихо Браге к Господу*, Франц Кафка, к тому времени не написавший еще ни *Метаморфозу*, ни *Процесс*, Берта Фанта, у которой собирались воинствующие сионисты, пытавшиеся (до поры тщетно) привлечь Эйнштейна к своему делу...

Однажды он получает письмо от неизвестного поклонника, желавшего навестить его в Праге. Через несколько дней Эйнштейн встречает его на вокзале «с сигарой в зубах и с Милевой». Незнакомец оказывается Паулем Эренфестом, женатым на Татьяне, русской и тоже физике. Он ровесник Эйнштейна, играет на рояле и мечтает работать с тем, кого считает своим идолом. Они очень быстро подружились.

Несмотря на обширные связи с «пражским кружком», Эйнштейн почему-то постепенно отдаляется от чешской столицы. В какой-то момент жена заметила, что после столь долгих и частых absences он рискует, однажды вернувшись, ее не узнать...

## Пуанкаре выдвинут на Нобелевскую премию

Учреждая в завещании 1896 г. премию своего имени, Альфред Нобель намеренно исключил математику. Сделал он это по чисто личной причине, опасаясь, что после его смерти премия может быть присуждена его сопернику... по женской части.\*

Шведский математик Густав Миттаг-Леффлер (1846–1927), основатель журнала *Acta Mathematica*, друг и большой поклонник Пуанкаре, начинает всемирную кампанию, агитируя за присуждение Нобелевской премии по физике за 1910 год Пуанкаре. На его призыв откликаются 34 крупных ученых. Комитет по присуждению премии рассматривает его предложение, но в конце концов решает, что «блестящий вклад» Пуанкаре в математическую физику «не может рассматриваться как открытие или изобретение в какой-либо конкретной области физики, если не трактовать физику в самом широком смысле этого слова».<sup>19</sup> Премия в том году присуждается голландскому физiku Йоханнесу Дидерику Ван дер Ваальсу за удовлетворительное разрешение проблемы межмолекулярных сил.

В 1911 г. лауреатом становится Вильгельм Вин. Он тут же пишет в Нобелевский комитет: «Предлагаю разделить премию за 1912 г. поровну между Лоренцом из Лейдена и Эйнштейном из Праги. С чисто логической точки зрения, принцип относительности следует считать одним из крупнейших достижений теоретической физики. [...] [Теория относительности] была создана индуктивным путем после того, как закончились неудачей все попытки обнаружить абсолютное движение. Лоренца следует считать первооткрывателем математического содержания принципа относительности, в то время как Эйнштейну удалось свести его к простым правилам. Поэтому заслуги обоих исследователей нужно считать сопоставимыми [...]».<sup>20</sup>

## Тревога!

В то время как друзья двигают его на Нобелевскую премию, в жизни Эйнштейна происходит курьезный эпизод. 12 апреля 1911 г. он пишет Паулю Эренфесту: «В *Physikalische Zeitschrift* только что опубликована совершенно ошибочная заметка [Владимира] Варичака, затрагивающая нас обоих. [...] Во избежание путаницы нужно опубликовать короткий ответ».<sup>21</sup>

Он тут же набрасывает этот ответ, где объясняет: «Автор [Варичак] неправильно проводит различие между воззрениями Лоренца и моими на физические факты. Сокращение не является реальным, поскольку оно не существует для наблюдателя, движущегося вместе с телом; однако оно реально, так как оно может быть принципиально доказано физическими средствами для наблюдателя, не движущегося вместе с телом».<sup>22</sup>

Эйнштейн таким образом считает, что его теория и теория Лоренца идентичны в том, что касается *физических фактов*, даже если, увы, нельзя отличить одну от другой, используя *наблюдаемые эффекты*.

\* Согласно распространенной «легенде», Миттаг-Леффлер безуспешно приударял за женой Нобеля. Некоторые исследователи полагают, что эта легенда лишена оснований, хотя бы по той причине, что Нобель никогда не был женат. Они считают, что математика была исключена потому, что премии должны были присуждаться за практические открытия и изобретения. См., например, *Mathematical Intelligencer*, vol. 7 (3), 1985, p. 74; E. Crawford, *The Beginnings of the Nobel Institution*, Cambridge Univ. Press, 1984. — (прим. перев.)



Друзья тут же бросаются на выручку, причем методами не столько научными, сколько авантюрными. Чтобы убедиться в этом, достаточно прочитать категорическое утверждение весьма квалифицированного физика Макса фон Лауэ: «Окончательного эксперимента, который позволил бы установить различие между теорией Лоренца и специальной теорией относительности Эйнштейна, не требуется. В теории Лоренца отсутствует объединяющий универсальный принцип, который как раз и придает такое величие теории относительности».<sup>23</sup>

## Проказы Ланжевена

Семейная жизнь Эйнштейна в Праге начинает идти под откос, и примерно то же происходит в Париже с Ланжевенем.<sup>24</sup> После Международного конгресса философов в Болонье он участвует в конгрессе Французского общества философов. Он бросается вычурными фразами: «*A priori* нет ни пространства, ни времени [...] Я хотел бы показать, что недостаточно проанализированная форма, в которой эти понятия преподносились до сих пор, была предопределена и обусловлена неким конкретным и переходным синтезом мира — чисто механистической теорией».

Он проводит аналогии, уподобляет научные теории «живым созданиям, наделенным внутренним стремлением к экспансии, которое заставляет их завоевывать новые территории», и выводит на первый план понятие «выживания наиболее приспособленных». Он утверждает, что «этот конфликт так же присущ человеческим существам, как и теориям. Электромагнетизм победил: без всяких усилий он поглотил оптику, завоевал большую часть физики, проник в химию и упорядочил огромное количество фактов, оставшихся доселе бесформенными и разрозненными». Даже его язык политизируется, он говорит, что механика есть «аристократия старого режима», а электромагнетизм — это «динамика формирующихся классов».

Он призывает философов помочь ему выковать новые понятия пространства и времени, и сотрудничать с ним в «создании нового адекватного языка», который не был бы языком математиков.<sup>25</sup> Поддавшись ему, философ Эдуар Леруа предлагает отныне проводить различие между «временем философов» и временем физиков, которое он предлагает называть «часовым». Над всей аудиторией витает дух безумия...

## Дискуссия Эйнштейна и Пуанкаре в Брюсселе

В ноябре Эйнштейн отправляется в Брюссель для участия в Сольвеевском конгрессе.

История этого конгресса предвосхищает некоторые будущие события. Сопредседатель конгресса Нернст уже много лет упорно пытается продемонстрировать справедливость того, что вскоре станут называть «третьим законом термодинамики».<sup>26</sup> Желая знать мнение Эйнштейна по этому поводу, и вообще оказать ему честь, Нернст ставит выступление Эйнштейна в самый конец, на последний день конгресса, 3 ноября 1911 г.

Но нас здесь интересует краткая стычка Эйнштейна с Пуанкаре во время дискуссии после выступления Эйнштейна. Не вдаваясь особо в детали, а лишь чтобы понять в чем вообще было дело, проследим ее перипетии.<sup>27</sup> Выступление Эйнштейна касалось применения понятия вероятности к форму-

лировке «третьего закона» термодинамики, именно того вопроса, который так волновал Нернста.

Дискуссия началась, когда Лоренц заметил, что смысл, который Эйнштейн придает слову *вероятность*, может привести его рассуждения к серьезным трудностям.

Лоренц поясняет: «Г-н Эйнштейн говорит о вероятности найти частицу на определенной высоте  $z$ . Однако, строго нужно говорить о вероятности нахождения частицы в интервале от  $z$  до  $z + dz$ , откуда следует, что эта вероятность есть  $Wdz$ , а не  $W$ ». И продолжает: «Это различие существенно, поскольку ничто не заставляет нас выбрать в качестве координаты  $z$ , можно было бы точно так же взять в качестве координаты, например,  $z^2$ , что потребовало бы введения вероятности, равной не  $W$ , а  $W/2z$ , откуда следовало бы, что “третий закон термодинамики” был бы справедлив лишь с точностью до некоторого переменного множителя, что недопустимо».

Эйнштейн возражает: «Каков бы ни был интервал  $dz$ , в конечном счете, для энтропии получится тот же закон».

На это следует лаконичный ответ Пуанкаре: «При определении вероятности выбор дифференциального элемента не может быть произвольным. Следует обязательно выбирать элемент фазового пространства».

Почуввав опасность, вмешивается Лоренц: «Г-н Эйнштейн [...] просто говорит о вероятности того, что координата  $z$  будет иметь определенное значение».

Эйнштейн тут же подхватывает: «Я использую чисто феноменологическое определение вероятности, независимое от какой-либо сопутствующей теории описания частиц».

Пуанкаре отвечает: «В любой теории, которой мы хотели бы заменить обычную механику, вместо элемента фазового пространства следовало бы как минимум выбрать в качестве дифференциального элемента инвариант».

*Инвариант* элемента...

Достаточно этого диалога, чтобы увидеть глубокое различие между подходами Эйнштейна и Пуанкаре: один из них математик, а другой — нет.

На «семейном фото», сделанном при закрытии конгресса, погруженный в свои мысли Пуанкаре сидит рядом с Марией Кюри. Эйнштейн стоит позади него, с сигарой в руке. Там присутствуют все великие: Планк, Бриллюэн, Рубенс, Зоммерфельд, Лоренц, Морис де Бройль, Перрен, Вин, Джинс, Резерфорд, Каммерлинг-Оннес, Газенорль...

Пуанкаре остается меньше девяти месяцев жизни...

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Merleau-Ponty J., *Einstein*, Paris, Flammarion, coll. «Figures de la science», p. 35.

<sup>2</sup>Через несколько лет его поклонником станет Адольф Гитлер.

<sup>3</sup>Mach E., *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung, Historisch-Kritisch Dargestellt*, Borckhaus, Leipzig, 1883. Русский перевод: *Механика. Историко-критический очерк её развития*, СПб, 1909.

<sup>4</sup>«В 1897 или 1898 году инженер чуть постарше [сам Бессо] направил к Маху молодого, горящего интересом к наукам человека, чтобы задать вопросы о существовании эфира и атомов, к тому самому Маху, который через знаменитого словацкого профессора Политехникума указал, что решающая роль отводится им наблюдаемым явлениям —

возможно, косвенно именно часам и масштабам...». Письмо Бессо Эйнштейну, 1947 г., *Correspondance*, doc. 151.

<sup>5</sup>Большинство членов комиссии по назначениям сочувственно относились к взглядам его отца.

<sup>6</sup>Mach E., *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, 2 ed., Leipzig, Barth, 1909. За две недели до этого Мах сообщил Фридриху Адлеру, что он собирается связаться с Эйнштейном. Письмо Маха Адлеру, 26 июля 1909 г., *Verein für die Geschichte der Arbeiterbewegung*, Wien, Adler-Archiv, doc. 130.

<sup>7</sup>Письмо Эйнштейна Маху, 9 августа 1909 г. *The Collected Papers*, op. cit., vol. V., doc. 174. Письма Маха Эйнштейну утрачены.

<sup>8</sup>Организация конгресса с участием математиков, физиков и врачей была вызвана вполне конкретной озабоченностью немецкого Общества натуралистов и врачей. Во время предыдущего конгресса ее ясно изложил Феликс Клейн: «В результате последних событий математики становятся все более и более изолированными. [...] Именно в этом и состоит растущая со дня на день опасность. Мы, члены Математического общества, намерены из всех сил бороться с этой опасностью, и именно поэтому мы собрали вместе естествоиспытателей и врачей». Цитата приводится по докладу Феликса Клейна о влиянии Римана на современную математику, сделанному в Вене 27 сентября 1894 г.

<sup>9</sup>Born M., «Über die Dynamik des Elektrons in der Kinematik des Relativitätsprinzips», *Physikalische Zeitschrift*, op. cit., vol. X, 1909, p. 814.

<sup>10</sup>Мы более детально коснемся этих вопросов далее.

<sup>11</sup>Einstein A., *Deutsche Physikalische Gesellschaft, Verhandlungen*, vol. VII, 1909, p. 482.

<sup>12</sup>Он был не так уж неправ, поскольку вторая часть выступления Эйнштейна посвящалась изложению теории «световых квантов» — зарождающейся области новой физики, в которой Эйнштейн противостоял Макс Планку, а потом и всем остальным физикам!

<sup>13</sup>Двумя с половиной годами раньше Зоммерфельд отозвался об «искусстве» Эйнштейна как чересчур догматичном и слишком абстрактном. Письмо Арнольда Зоммерфельда Лоренцу, 26 сентября 1907 г., *Rijksarchief Noord-Holland*, Haarlem, Archief H.A. Lorentz.

<sup>14</sup>Письмо Эйнштейна Зоммерфельду, 29 сентября 1909 г. *The Collected Papers*, op. cit., vol. V., doc. 179.

<sup>15</sup>Письмо Кляйнера неустановленному адресату, 18 января 1911 г., *Staatsarchiv des Kantons Zürich*. По сей день причина конфликта остается невыясненной.

<sup>16</sup>Он был известен всем под именем Пражского немецкого университета (*Prager Deutschen Universität*).

<sup>17</sup>По иронии судьбы, 21 октября 1916 г. в Вене Фридрих Адлер убьет графа, ставшего к тому времени премьер-министром, воскликнув при этом: «Долой тиранию!».

<sup>18</sup>*The Collected Papers*, op. cit., vol. V., doc. 264.

<sup>19</sup>Доклад Нобелевского комитета за 1910 г.

<sup>20</sup>Письмо В. Вина в Нобелевский комитет; цитируется по Pais, *Subtle is the Lord...*, op. cit., p. 153. (А. Пайс, *Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*, стр. 149.) Лоренц уже был удостоен премии в 1902 г.

<sup>21</sup>*The Collected Papers*, op. cit., vol. V., doc. 264.

<sup>22</sup>Einstein A., *Physikalische Zeitschrift*, op. cit., vol. XII, 1911, p. 509. *The Collected Papers*, op. cit., vol. III., doc. 22. (*Собрание научных трудов А. Эйнштейна*, том I, стр. 187.)

<sup>23</sup>Von Laue M., *Das Relativitätsprinzip*, Braunschweig, 1911, p. 19. Отметим, что такого рода пренебрежительные заявления встречаются до сих пор. Многие физики отвергают теорию струн (см. Приложения) на том основании, что в ней отсутствует объединяющий универсальный принцип.

<sup>24</sup>И в личной жизни (его похождения приобретают черты любовной мелодрамы), и в жизни публичной все идет наперекосяк. Langevin P., «L'évolution de l'espace et du temps» («Эволюция пространства и времени»), выступление на IV Международном конгрессе философов в Болонье, *Scientia*, vol. X, 1911, p. 31; «Le temps, l'espace et causalité» («Время, пространство и причинность»), *Bulletin de la Société française de philosophie*, выступление 19 октября 1911 г., vol. XII, 1912, p. 1.

<sup>25</sup>Позиция Пуанкаре при таком конфликте была вдвойне незавидной. Во-первых, он был математиком, а потому лицом подозрительным, а во-вторых, он был двоюродным братом Раймона Пуанкаре, будущего президента Франции, относившегося скорее к «правому» крылу, что делало Анри Пуанкаре еще более подозрительным субъектом!

<sup>26</sup>Этот закон гласит, что энтропия системы стремится к нулю при стремлении ее температуры к абсолютному нулю, или другими словами, что постоянная в уравнении Планка  $S = k \log W + const$ , связывающем энтропию с вероятностью, может быть принята равной нулю.

<sup>27</sup> *The Collected Papers*, op. cit., vol. III., doc. 27.

## Последние дни Пуанкаре

### Портрет Эйнштейна работы Пуанкаре

После Сольвеевского конгресса Эйнштейн возвращается в Прагу. Он уже втайне решил, что не хочет больше там оставаться, но не знает, куда отправиться. На выбор у него есть несколько вариантов. Лоренц предлагает ему место в Утрехте. Его старый сокурсник Марсель Гроссман старается устроить его в Цюрихский политехникум.\*

Узнав об этом, Эйнштейн ведет себя уклончиво с Лоренцом, сообщая тому, что решил остаться в Праге, где в его распоряжении просторный институт и великолепная библиотека, а сам в тот же день пишет своему другу Цангеру: «Оставим политехникуму его неисповедимые пути...».<sup>1</sup> Между прочим, он сообщает о своих брюссельских впечатлениях: «Лоренц — это чудо ума и такта. По-моему, из всех присутствовавших теоретиков он обладает самым мощным интеллектом. Что касается Пуанкаре, то в целом он был настроен отрицательно; несмотря на свой выдающийся ум, он продемонстрировал плохое понимание ситуации. Планк отчаянно цепляется за предвзятые идеи [...]».<sup>2</sup>

Уроженец Альзаса Пьер Вайс, сменивший прежнего преподавателя физики Эйнштейна в политехникуме Генриха Вебера, просит Марию Кюри и Пуанкаре поддержать кандидатуру Эйнштейна. Пуанкаре тут же посылает свою рекомендацию. Вначале она очень лестная: «Г-н Эйнштейн — один из самых оригинальных из известных мне мыслителей», а потом наполняется ледяной иронией: «[...] но поскольку он проводит исследования во всех направлениях, можно ожидать, что большинство путей исследования заведут его в тупик. Можно однако ожидать, что хотя бы одно из выбранных им направлений приведет к успеху, и этого достаточно. Роль математической физики состоит в том, чтобы задавать вопросы, но лишь опыт может дать на них ответы».<sup>3</sup>

Пока идет эта переписка, Эйнштейн пишет физико-химику Эмилю Варбургу (1846–1931), президенту Физико-технического общества Берлина. Варбург приглашает навестить его в пригороде Берлина Шарлоттенбурге. Подразумевается, что между прочим можно было бы обсудить и... переезд Эйнштейна в Берлин. Спустя три недели Эйнштейн получает еще более обнадеживающее послание от химика Фрица Хабера (1868–1934), будущего Нобелевского лауреата, профессора Берлинского университета, и что еще более важно, директора Института физической химии, специально основанного для него на дар в миллион марок от богатого финансиста Леопольда Коппеля (1854–1933), основателя фонда его имени.

В первых числах апреля 1912 г. Эйнштейн отправляется в Берлин. 15-го он у Эмиля Варбурга, 16-го — у Фрица Хабера, 19-го — у Нернста, 20-го — снова у Варбурга... Там же он встречается со своей двоюродной сестрой Эльзой Ловенталь, только что разведенной. Он мгновенно очарован. По возвращении в Прагу, он пишет ей страстные письма и одержим одним желанием — воссоединиться с ней как можно скорей. «Мне нужно кого-то любить, иначе я буду несчастен. И этот кто-то — ты».<sup>4</sup>

\* В 1911 г. немецкое наименование этого учебного заведения изменилось, но по-русски его традиционно называют старым именем «политехникум». — (прим. перев.)

## Эйнштейн ворошит муравейник. . .

Ответив (как мы видели отказом) на приглашение Лоренца, Эйнштейн тут же пользуется случаем сообщить ему о двух «небольших открытиях», сделанных им с момента последней встречи. Второе из них касается влияния гравитационного поля на скорость света. «Простые и замечательные результаты получились почти автоматически». Понятными и простыми словами он объясняет суть своего нового теоретического подхода.

«Скорость света  $c$  не постоянна. Она определяет силу притяжения [...] Инертная масса тела равна  $m/c$ , т.е. она уменьшается с полем тяготения. Уравнения движения в целом находятся в согласии с обычной теорией относительности». <sup>5</sup> Он добавляет, что верит в действительную эквивалентность гравитационного поля и «поля ускорения».

Однако, заявляя о *непостоянстве* скорости света, Эйнштейн бросает жука в муравейник. С легким сердцем и даже с энтузиазмом он отказывается от одного из двух постулатов всей своей кинематики местного времени!

Чего вдруг? А оттого, что ему показалось, будто он нашел фундаментальную характеристику тяготения, которую описал в двух статьях, направленных в *Annalen der Physik* 26 февраля и 23 марта. Идея, принятая им за истину, станет причиной трудностей, с которыми он столкнется в последующие три решающих года до окончательного построения общей теории относительности. Согласно этой идее, статическое гравитационное поле влияет лишь на координату времени (что у Пуанкаре соответствует *ict*, но Эйнштейн так до сих пор и не пользуется таким обозначением!), единственную из четырех координат, в которую скорость света входит в явном виде. <sup>6</sup>

Абрагам, строящий в Милане альтернативную теорию, тут же атакует такое представление, которое он считает несовместимым с основами теории относительности. Эйнштейн реагирует немедленно. Он пишет своему бывшему ассистенту Людвигу Хопфу: «Я разработал теорию тяготения для случая статического поля совершенно строгим образом. Вещь получилась исключительно красивая и замечательно простая. Теория Абрагама совершенно неверна. Словесная дуэль между нами по этому вопросу вполне вероятна». И воинственно добавляет: «Предстоит погрызться еще и с Нернстом. Он нашел доказательство своего третьего закона, которое совершенно ошибочно. Будет еще одна словесная баталия, и весьма ядовитая». <sup>7</sup>

К маю все затихает. Правда, из Санкт-Петербурга приходит письмо от Эренфеста, в котором тот говорит о гравитации на языке пространства-времени и с использованием соответствующего формализма. Все это Эйнштейн в своих ответах величественно игнорирует. <sup>8</sup> Но момент истины приближается. . .

## Пуанкаре интересуется атомом

Пока Эйнштейн в Праге озабочен тяготением (и мечтает о встрече с кузиной), Пуанкаре в Париже находит новую пищу для ума. Выступая в Академии наук 4 декабря 1911 г. и затем еще раз в январе 1912 г., он закладывает фундамент того, что станет нашей теперешней квантовой механикой. Прочтем первые несколько строк его выступления: <sup>9</sup>

«На недавно проходившем в Брюсселе конгрессе, где собрались 23 физика из разных стран, почти постоянно приходилось слышать, что новая

механика противостоит механике старой. Однако, что же это за старая механика? Механика ли это Ньютона, которая безусловно царила вплоть до конца XIX века? Нет, это механика Лоренца,<sup>10</sup> механика принципа относительности, которая каких-то пять лет назад казалась вершиной смелости».

Поставив такой фундаментальный вопрос, он тут же на одном дыхании дает на него ответ: «Значит ли это, что новая механика Лоренца была лишь эфемерным баловнем судьбы, капризом моды, и что мы вот-вот ринемся обратно к столь безрассудно брошенным старым божествам? Ни за что, потому как завоевания прошлого остались в сохранности, но везде, где она выходит за рамки механики Ньютона, новая механика продолжает существовать самостоятельно».<sup>11</sup>

Он обращает взор в будущее: «Но в своем безрассудстве мы хотим пойти еще дальше, внести еще большую смуту. Мы уже больше не задаемся вопросом, не следует ли изменить дифференциальные уравнения динамики, мы теперь спрашиваем, а могут ли вообще дифференциальные уравнения описывать законы движения. За этим может последовать революция еще более грандиозная, чем та, которую начал в натурфилософии Ньютон». И забивает последний гвоздь: «Спрашивается, не следует ли ввести в законы природы дискретные величины, появляющиеся не в явном виде, но фундаментальные».

*Фундаментальные дискретные величины...*

Вернемся к разделу 5 этой его работы. «Напомню, — говорит Пуанкаре, — что исследование термодинамического равновесия свелось к вопросу статистики и вероятности». Он цитирует Планка (текст он переводит с немецкого сам «как можно более точно, чтобы не исказить мыслей автора, но в то же время резюмируя их»): «Вероятность непрерывной переменной получается из предположения о наличии независимых элементарных областей с равной вероятностью...». Это ключевая фраза. На следующей странице Пуанкаре укажет, что отныне нужно прояснить для определения элементарных областей вероятности.

Поясним, о чем идет речь. Предположив, вслед за Планком, что в природе существуют «фундаментальные дискретные величины», мы тем самым утверждаем, что эта дискретная величина — этот *квант* — *неделим* на более мелкие части. Именно эту *неделимость* следует попытаться объяснить, или по крайней мере описать, в качестве основы новой физики. И вот что говорит Пуанкаре:

«Эти элементарные области неделимы, т.е. когда известно, что мы находимся в одной из таких областей, все остальное определено. Иначе, если бы последующие события не были полностью известны, если бы они менялись в зависимости от того, в какой части области мы находимся, такая область не была бы неделимой с точки зрения вероятности, поскольку вероятность некоторых будущих событий не была бы одной и той же в разных частях области».

Он отважно набрасывается на самую загадочную тайну природы, ту самую, которая так занимала греков: что такое Сущность?

Пуанкаре переформулирует вопрос: Сущность неделима. Но почему? Ответ его поразителен. Пифагору он определенно не пришел бы в голову, как не пришел он в голову и Эйнштейну, так что ситуация сложилась весьма интригующая. Эйнштейн никогда не предложил бы объяснить фундаментальную неделимость, прибегнув к вероятности. «Бог не играет в кости», —

любил повторять он. Для Пуанкаре же, если фундаментальный квант неделим, то он неделим «с точки зрения вероятности», то есть Бог — заядлый игрок.

В то время дискуссия Пуанкаре с Эйнштейном по этому вопросу осталась незамеченной.<sup>12</sup> А ведь никогда ни до, ни после, эти двое ученых не сталкивались на столь противоположных позициях по столь фундаментальному вопросу. В конечном счете, Эйнштейн дорого заплатит за свое упрямство: бурное развитие квантовой механики пойдет без него и «против него», по крайней мере, без его согласия или одобрения.

## Последние мысли

9 декабря 1911 г. Пуанкаре посылает своему другу, директору и основателю Математического общества Палермо, математику Гуччию статью, озаглавленную *Об одной теореме геометрии* и начинающуюся словами: «Никогда еще я не представлял общественности работу, столь далекую от завершенности [...]». Чувствуется, что Пуанкаре чем-то встревожен, но как всегда, очень занят.

1 января его назначили директором Французской академии.<sup>13</sup> 21 января он произнес речь в Сорбонне на юбилей Гастона Дарбу; 14 февраля — выступление на похоронах Ипполита Ланглуа;\* 26 — речь на юбилей Каммила Фламариона; 7 марта — выступление перед ассоциацией «Вера и жизнь».

По просьбе Макса Абрагама 11 апреля 1912 г. Пуанкаре читает для членов Французского физического общества лекцию «Связи между веществом и эфиром». В этом выступлении попадаются несколько чисто «пуанкаристских» высказываний. Приведу лишь одно из них: «Атомы — это теперь не просто удобные фикции; как только мы научились их считать, так и кажется, что мы их видим». Но есть еще кое-что, что привлекает наше внимание — впервые и притом дважды, он упоминает Эйнштейна: «Г-н Эйнштейн исследовал действие света на молекулы...». И чуть ниже: «Г-н Эйнштейн [...] уподобил свои молекулы малым подвижным резонаторам, которые одновременно обладают живой силой перемещения и энергией, связанной с электрическими колебаниями». Он отмечает: «Результат во всех случаях оказывается одинаковым — он получает закон Рэлея». И далее: «Что касается меня, то я поступил бы наоборот, т.е. исследовал бы воздействие молекул на свет». Чуть дальше в своей, увы, катастрофически деликатной манере он вновь приписывает Лоренцу открытие принципа относительности: «Теперь нужно перейти от действия одной покоящейся молекулы к действию движущейся молекулы. [...] Это нетрудно, поскольку нужно лишь применить принцип относительности Лоренца».<sup>14</sup>

Если бы вместо «Лоренца» он сказал «Пуанкаре», все стало бы на свои места, ведь он выступал не где-нибудь, а во *Французском физическом обществе*! Но сказано это не было, и шанс был упущен.

В первых числах мая он в Лондоне. Там он читает лекции о логике бесконечного — 3 мая, о пространстве и времени — 4 мая, о теории квантов Планка — 11 мая. В этих выступлениях содержатся его последние мысли по двум основным темам его размышлений.

\* Hippolyte Langlois (1839–1912), французский генерал-артиллерист и член Академии наук. — (прим. перев.)



В лекции студентам Лондонского университета 4 мая он высказывает последние мысли по теме, над которой размышлял больше всего.<sup>15</sup> Он предупреждает слушателей: «Одной из причин, по которой я вынужден вернуться к вопросу, наиболее часто рассматривавшемуся мной ранее, является недавно свершившаяся революция в наших взглядах на механику [квантовая революция]».

Сначала он возвращается к принципу относительности, которому дает новое имя — «принцип физической относительности» — и поразительное определение: «Он более не является лишь соглашением; он проверяем и потому может и не подтвердиться; он есть экспериментальная истина».

Каков же смысл этого принципа? «Он означает, что взаимное действие двух тел стремится к нулю, когда эти тела расходятся на бесконечное расстояние; он означает, что два удаляющихся мира ведут себя так, как если бы они были независимы друг от друга». Принцип физической относительности, таким образом, не является «необходимостью, вызванной самой природой нашего мышления, а есть экспериментальная истина, пределы которой кладет опыт». Остается лишь сожалеть, что до нас не дошло дальнейшее развитие этих вызревших у Пуанкаре идей по поводу принципа относительности.

После утверждения о том, что принцип физической относительности может служить для определения пространства, он дает следующее объяснение: «Он дает нам, так сказать, новый инструмент измерений. Поясняю: как твердое тело могло бы помочь проводить измерения, или скорее, создать пространство? Перемещая твердое тело из одного положения в другое, мы признали бы, что можно применить перемещение сначала к одной фигуре, а затем к другой и договориться, что обе эти фигуры одинаковы».

Это, как легко увидит читатель, и есть метод, предложенный Эйнштейном. Посмотрим, что он означает для Пуанкаре.

Далее Пуанкаре продолжает, возможно, слегка завуалированную критику такого метода: «Определить пространство таким образом, что твердое тело сохраняет при перемещении свою форму, означает определить способ, при котором уравнения равновесия тела не будут изменяться при изменении осей; однако, эти уравнения равновесия есть лишь частный случай обобщенных уравнений динамики, которые, согласно принципу физической относительности, не должны изменяться при изменении осей».

Итак, нужно принять новый способ определения пространства. Пуанкаре предлагает построить его на базе «группы преобразований, не изменяющих наших дифференциальных уравнений», откуда следует новый способ установления эквивалентности двух фигур: «Можно заменить твердое тело другой механической системой; более того, новое соглашение определяет не только пространство, но и время. [...] В самом деле, все происходит так, как если бы время было четвертым пространством измерения; и как если бы четырехмерное пространство, образуемое комбинацией обычного пространства и времени, могло поворачиваться не только вокруг оси обычного пространства, так чтобы время не изменялось, но и вокруг любой другой оси. [Однако] для того, чтобы сравнение было справедливо математически, необходимо придать этой четвертой координате пространства чисто мнимые значения».

Откуда следует вывод: «При таком новом подходе, пространство и время есть две части одного целого, и эти части настолько тесно связаны между собой, что разделить их затруднительно».

Различия между подходами Эйнштейна и Пуанкаре здесь проявляются особенно ярко. Для Эйнштейна, по крайней мере в 1905 г., твердые тела находятся в *обычном* пространстве — это его знаменитые «твердые стержни» или «линейки». Согласно же Пуанкаре, «твердые» тела могут существовать лишь в релятивистском четырехмерном пространстве. В этом и состоит фундаментальное различие, причем прав Пуанкаре, хотя это не всем стало очевидно при его жизни (впрочем, и до сего дня встречаются физики, которые не видят этого тонкого различия).

Размышляя над приведенными выше словами, можно представить себе, что «обобщенная теория относительности» вполне могла бы быть создана Пуанкаре, если бы он довел до конца свои идеи. Из этих слов можно заключить, что она основывалась бы на группе преобразований, которые «не изменяли бы вида наших дифференциальных уравнений».

## Смерть Пуанкаре

22 мая Пуанкаре находится в Вене, где читает лекцию о взаимосвязи науки и гуманитарных ценностей. По возвращении в Париж он выступает 26 июня перед Французской лигой морального просвещения, затем, 4 июля, председательствует на совете Обсерватории. Присутствовавший там Дарбу нашел, что он заметно нервничал. По окончании заседания Пуанкаре сказал Дарбу, что ему предстоит еще одна операция. В следующую субботу он участвует в работе совета факультета в Сорбонне, где читает доклад о работах Эли Картана по теории групп, доклад, который «по своей теме был изложением личных взглядов на теорию групп», как сказал потом Поль Аппель.<sup>16</sup> По окончании доклада Пуанкаре подтверждает Аппелю, что завтра ложится в больницу.

Накануне, 7 июля, он направляет в *Annales de la faculté des sciences de Toulouse* статью «Модульные функции и фуксовы функции». Это была последняя написанная им работа, он не успел поправить ее гранки.

9 июля его прооперировали и через несколько дней он уже был дома, где по совету врачей оставался в постели. Утром, 17 июля, он почувствовал боль, пытаясь встать с постели, и тут же скончался от закупорки сосудов.

Тогда же, в Геттингене, Давид Гильберт решает заняться физикой.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Письмо Эйнштейна Г.Цангеру, 15 ноября 1911 г., *The Collected Papers*, op.cit., vol. V, doc. 305.

<sup>2</sup>Эйнштейн редко упоминал Пуанкаре, тем не менее, однажды, во время публичного выступления в Берлинской академии наук 27 января 1921 г., озаглавленном *Геометрия и опыт*, он сказал: «Если отвлечься от связи между телом аксиоматической евклидовой геометрии и реальным практическим твердым телом, то мы легко приходим к точке зрения, которой придерживался такой оригинальный и глубокий мыслитель как Анри Пуанкаре: евклидова геометрия отличается от всевозможных мыслимых аксиоматических построений своей простотой».

Отсюда Эйнштейн делает фундаментальный вывод: «А так как аксиоматическая геометрия сама по себе никаких высказываний о реальной действительности не содержит и может это делать лишь совместно с физическими законами, то представлялось бы возможным и разумным придерживаться евклидовой геометрии, какими бы свойствами ни обладала действительность. Если же будет обнаружено противоречие между теорией и опытом, то легче согласиться с изменением физических законов, чем с изменением аксиоматической евклидовой геометрии».

Идя еще дальше, он говорит: «Если забыть о связи между практически твердым телом и геометрией, то будет нелегко отказаться от соглашения, что евклидову геометрию следует сохранять как простейшую. Почему Пуанкаре и другие исследователи отклоняли напрашивающуюся эквивалентность практически твердого тела из реального опыта и геометрического тела? [...] [Потому, что] о поведении реальных вещей геометрия (Г) ничего не говорит; это поведение описывает только геометрия с совокупностью физических законов (Ф). Выражаясь символически, мы можем сказать, что только сумма (Г) + (Ф) является предметом проверки на опыте. Таким образом, можно произвольно выбрать как (Г), так и отдельные части (Ф): все эти законы представляют собой соглашения».

И заключает: «По моему мнению, такое воззрение Пуанкаре с принципиальной точки зрения совершенно правильно». (Цитируется по Собранию научных трудов А. Эйнштейна, *Геометрия и опыт*, том II, стр. 85–86.)

<sup>3</sup>Пуанкаре А., Рекомендательное письмо в поддержку кандидатуры Эйнштейна, Seelig C., Albert Einstein, *Leben und Werk eines Genies unserer Zeit*, op. cit., p. 163.

<sup>4</sup>Письмо Эйнштейна Эльзе Ловенталь, 30 апреля 1912 г., *The Collected Papers*, op. cit., vol. V, doc. 391.

<sup>5</sup>Письмо Эйнштейна Лоренцу, 18 февраля 1912 г., *The Collected Papers*, op. cit., vol. V, doc. 260.

<sup>6</sup>Эйнштейн будет потрясен, поняв спустя несколько лет, что эта идея была неверна! Мы еще увидим, как это повлияло на его мышление в дальнейшем.

<sup>7</sup>Письмо Эйнштейна Людвигу Хопфу, *The Collected Papers*, op. cit., vol. V, doc. 364.

<sup>8</sup>А ведь таким языком все пользуются уже пять лет!

<sup>9</sup>Poincaré H., *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. 153, 4 декабря 1911 г., p. 1104; *Journal de physique théorique et appliquée*, 5 s. t. II, январь 1912 г., p. 5–34.

<sup>10</sup>Отметим его скромность. Он называет ее не «механикой Лоренца-Пуанкаре», а «механикой Лоренца».

<sup>11</sup>Некоторые историки науки высказывали мнение, что в самом конце жизни Пуанкаре отказался от принципа относительности, чтобы вернуться к старым доктринам. «Чувствуется, насколько образ мыслей Пуанкаре расходится здесь с образом мыслей Эйнштейна», — пишет М.-А. Тоннеля. «Релятивистский кризис остается для Пуанкаре вопросом чисто экспериментальным и, возможно, эфемерным». Tonnelat M.-A., *Histoire du principe de relativité*, op. cit. Но ведь Пуанкаре как раз и говорил, что это не эфемерный вопрос.

<sup>12</sup>Для Пуанкаре эта дискретность, названная Планком «квантом действия», представляла собой — и должна была представлять — «истинный атом».

<sup>13</sup>Он останется на этой должности до 1 апреля.

<sup>14</sup>Poincaré H., Воспроизводится в *Dernières pensées*, op. cit., p. 216.

<sup>15</sup>Poincaré H., «L'Espace et le Temps», лекция, прочитанная в Лондонском университете 4 мая 1912 г. Воспроизводится в Henri Poincaré, *Dernières pensées*, op. cit., p. 53.

<sup>16</sup>Appel P., *Henri Poincaré*, op. cit., p. 116.

# Общая теория относительности

Мы не должны рассматривать в качестве основ реальной вселенной вспомогательные мыслительные средства, к которым мы прибегаем для представления мира на арене мысли.

Эрнст Мах *Механика*, 1883

## Повторится ли история?

### Передача эстафеты

В 1912 г., к моменту кончины Пуанкаре, Давид Гильберт являл собой странный персонаж. Ему только что исполнилось пятьдесят (родился он 1862 г.), обширную лысину он прикрывал панамой с широкими полями, любил танцевать и охотно волочился за хорошенькими женщинами, которых называл «пламенем души».<sup>1</sup>

Кто он — предвестник сюрреализма? О его врожденное благородство разбивались невысказанные упреки: «Да что вы, он же само благочестие!». Смерть Пуанкаре сделала его «величайшим из живущих математиков».<sup>2</sup> Что это — передача эстафеты или простое совпадение? Как бы то ни было, Гильберт решает заняться физикой и объявляет почему: «Физика слишком трудна для физиков».

Его друг Зоммерфельд направляет ему в помощь из Мюнхена молодого 24-летнего физика Пауля Эвальда. Гильберт тут же заявляет ему: «Математику мы уже переделали, теперь возьмемся за переделку физики, а там и химии».<sup>3</sup> С Эвальдом Гильберт проходит теорию излучения, молекулярную теорию и теорию электронов. По случаю поездки в Швейцарию он даже пишет Эйнштейну с просьбой выслать экземпляры работ по этим темам.

После отъезда Эвальда учителем физики у Гильберта становится Альфред Ланде. Каждое утро он направляется на Вильгельм-Вебер-штрассе, где живет Гильберт, с обзором статей и работ по его выбору. Потом он сопровождает его до аудитории, по пути продолжая рассказывать. В таком режиме, объясняя физику Гильберту, Ланде учился ей сам.<sup>4</sup> А Гильберт ее преподавал... по мере освоения. Вскоре и учитель, и ученик (хотя кто был кем, непонятно) стали специалистами практически во всех областях физики того времени, в том числе, конечно, и теории относительности.

Во все времена человек ставил перед собой, казалось бы, невыполнимые задачи: совершить полет, покорить Эверест, пройти по Луне... В 1912 году, приняв эстафету от Пуанкаре и Минковского, Гильберт устремляет взор на заснеженную недостижимую вершину — *общую ковариантность*.

Нам уже известно, что уравнения Максвелла остаются неизменными при переходе от точки  $x, t$  пространства-времени к *заданной* соседней точке  $x' = x + \varepsilon t, t' = t + \varepsilon x$ , где  $\varepsilon$  может быть сколь угодно малым. Это и было одним из открытий Пуанкаре. Но уравнения не остаются неизменными при переходе к *любой* соседней точке  $x' = x + \varepsilon, t' = t + \delta$ , где  $\varepsilon$  и  $\delta$  могут быть сколь угодно малы, *независимо друг от друга*. Уравнения Максвелла, следовательно, есть уравнения с *ограниченной* ковариантностью. Гильберт поставил себе задачу создать теорию с *общей* ковариантностью.

Разница между *ограниченной* и *общей* ковариантностью может показаться совершенно несущественной, но последствия ее колоссальны. Требования общей ковариантности огромны, и в отсутствие Пуанкаре и Минковского их последователям нужно было проявить изумительную изобретательность, чтобы обуздать это чудовище.

Мнения о том, как браться за дело, разделились. Одни, и среди них друг Гильберта Ми,<sup>5</sup> хотели строить новую общековариантную теорию на основе электромагнетизма; другие, среди них Эйнштейн, разрабатывали новую теорию только тяготения, да и эта задача представлялась им достаточно трудной. Лоренц, Абрагам, Планк, Зоммерфельд примкнули кто к одному, кто к другому лагерю...

Только Давид Гильберт решает взяться за обе задачи сразу.

## Эйнштейн покидает Прагу

В 1912 г., к моменту кончины Пуанкаре, Эйнштейн переезжает из Праги в Цюрих. По этому поводу даже пошли толки. Через несколько дней, он не без юмора объяснил свое решение: «Я решил уехать из Праги потому, что обещал вернуться в Цюрих, как только представится благоприятный случай. Среди прочего, Цюрих идеально расположен — рядом с горами и озером, что особенно притягательно для отца семейства».<sup>6</sup>

Эйнштейн не упоминает (но это станет очевидным ниже), что после шестнадцати месяцев в Праге он бурлит «идеями Маха», которые еще больше захватили его под влиянием Лампа и Пика. Он пришел к твердому убеждению, что для их осуществления ему совершенно необходима помощь математика. А кто же мог помочь лучше, чем его однокурсник по политехникуму Марсель Гроссман, тот самый, по чьим конспектам он готовился к экзаменам, и ставший теперь новым руководителем бывшей секции VI-A политехникума!<sup>7</sup>

10 августа Эйнштейн и семейство размещаются в солнечном квартале Цюрихберг, в доме 116 по Хофштрассе. Примерно в то же время Гроссман отправляется в Англию, в Кембридж, на пятый Математический конгресс. По его возвращении Эйнштейн восклицает: «Я натолкнулся на непреодолимые для меня математические трудности. Гроссман, ты должен мне помочь или я свихнусь».<sup>8</sup>

Согласно Пайсу, все произошло очень быстро: «[В 50-е годы в Принстоне] я спросил его, как началось сотрудничество с Гроссманом. Я очень

хорошо помню ответ Эйнштейна. Он рассказал Гроссману о своих проблемах и попросил его сходить в библиотеку и посмотреть, существует ли геометрия, подходящая для таких задач. На следующий день Гроссман пришел и сказал, что такая геометрия и вправду существует — это риманова геометрия». Пайс также упоминает, что Гроссман «охотно согласился совместно работать над проблемой, но все-таки с тем ограничением, что он не берет на себя никакой ответственности за какие-либо физические утверждения и интерпретации».<sup>9</sup>

В основу своего подхода Эйнштейн положил принцип экономии, знаменитую доктрину махизма, в которой он только укрепился за время пребывания в Праге, и согласно которой «[следует основывать изучение природы] на минимуме неоспоримых принципов, наиболее общих и независимых друг от друга, из которых можно вывести все остальное [даже если набор таких принципов] не задан исходно, а должен быть сначала установлен».

У него уже есть три основных принципа. Рассмотрим их подробнее, поскольку они играли важную роль в его подходе.

1. Принцип относительности (Эйнштейн иногда называет его постулатом относительности);
2. «Гипотеза эквивалентности», которая вскоре станет «принципом эквивалентности»;
3. Принцип относительности инерции, который он вскоре переименует в «принцип Маха».

Принцип эквивалентности вызывает трудности. Он применим, и то лишь приблизительно, для частного случая статического гравитационного поля, то есть поля, не изменяющегося во времени. Однако, такой простоты не бывает. Даже на обыкновенную каплю воды, свободно падающую в поле тяготения Земли, действует «приливная» сила, проявляющаяся больше с одной стороны капли, чем с другой, что, как следствие, опровергает принцип эквивалентности. Тем не менее, этот принцип служил ему руководством к действию. Отдадим должное его упорству — без такой приверженности этому принципу он, возможно, не пришел бы к поставленной цели.

Основы только-только заложены, а тут же возникает новая проблема. Избавившись, благодаря принципу относительности, от понятий пространства, времени и абсолютного эфира, как теперь избавиться от абсолютного «пространства-времени»? Эйнштейн прибегает к компромиссу, возможно, под влиянием следующего поразительного отрывка из *Механики* Маха: «Я показал в другом месте, что среди прочих вспомогательных математических приемов можно пользоваться пространством с более чем тремя измерениями, рассматривая его, однако, не иначе как чистую абстракцию».<sup>10</sup>

Пространство четырех измерений. . . Это именно то, что нужно Эйнштейну для продолжения своего подхода к тяготению. Этого он и хочет, но предпочитает рассуждать о пространстве (с твердыми стержнями) и о времени (с синхронизированными часами), то есть о трех измерениях. А можно ли производить измерения в *четырёхмерном* пространстве-времени с помощью линеек и часов?

Избегая придавать, вопреки себе, пространству-времени «абсолютную реальность», он решает отныне говорить о «пространственно-временном

континууме», не уточняя однако есть ли это четырехмерное «пространство-время», или же это обычное «пространство».<sup>11</sup>

Тем временем, Гроссман («сходив в библиотеку», как рассказал Эйнштейн) уже получил нужные сведения. Борн, а также Минковский, Зоммерфельд и фон Лауэ, а в особенности новый сотрудник Венского университета Фридрих Коттлер, установили, какие математические методы требуются для успеха. И что же это за методы? — спрашивает Эйнштейн. *Дифференциальная геометрия и тензорный анализ* — всего четыре слова.

В тех самых стенах, где пятнадцатью годами ранее он охотно прогуливал лекции Минковского по математике (и профессора Гайзера, преподававшего как раз дифференциальную геометрию!), Эйнштейн бросается изучать эти две области математики, которыми ему было совершенно необходимо овладеть, чтобы добраться до далекой сияющей вершины.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Он всем подряд рассказывал, что идеал отпуска для него — это отпуск, проведенный с женой коллеги.

<sup>2</sup>Reid C., *Hilbert*, op.cit., p. 127.

<sup>3</sup>*Ibid.*, p. 133.

<sup>4</sup>По словам Альфреда Ланде, «Гильберт думал только о математике. Теперь, когда смерть Пуанкаре сделала из него величайшего математика своего времени, он полагал, что ему принадлежало абсолютно всё — от жены до всего остального». Ланде говорил, что Гильберт «вытряхивал из него физику. Только для этого я и был ему нужен». Как заметил хорошо знавший его Зоммерфельд, «он был эгоистом для дела, а не для себя». Reid C., *Hilbert*, op. cit., p. 41.

<sup>5</sup>Густав Ми (Gustav Mie) был профессором физики в университете городка Грайфсвальд, на самом берегу Балтийского моря, в 150 км к северу от Берлина. Гильберт любил Ми и оказывал ему всяческую поддержку.

<sup>6</sup>Эйнштейн А., «Почему я уехал из Праги», 3 августа 1912 г., *The Collected Papers*, vol. V., doc. 414.

<sup>7</sup>Марсель Гроссман был только что назначен руководителем секции VIII в политехникуме.

<sup>8</sup>Рассказано Луи Коллросом, бывшим сокурсником Эйнштейна и Гроссмана в Политехникуме (L. Kollros, *Helvetica Physica Acta*, Basel, Birkhauser, vol. IV (supplément), 1956, p. 271); см. также Seelig C., Albert Einstein, op. cit., p. 163.

<sup>9</sup>В биографии Эйнштейна Филип Франк, сменивший Эйнштейна в Праге, утверждает, что вскоре после переезда того в Прагу, он признался Пику «в математических трудностях, с которыми столкнулся, пытаясь обобщить теорию относительности», после чего Пик предположил, что «подходящим математическим инструментом для развития такого подхода является абсолютное дифференциальное исчисление математиков Риччи и Леви-Чивита» (Frank P., *Einstein, his Life and Time*, New York, Knopf, 1947). Эйнштейн же в популярном чешском издании с изложением теории относительности в 1922 году (*Vorwort des Autors zur Tschechien Ausgabe, Einsten a Praha*, Prometeus, Prague, 1979, p. 42) утверждал, что «Впервые решающая идея об аналогии между проблемами теории относительности и проблемами теории поверхностей Гаусса возникла у меня в 1912 году по возвращении в Цюрих, когда я еще не знал о работах Римана, Риччи или Леви-Чивиты».

<sup>10</sup>К чему Мах предусмотрительно добавил, чтоб его не признали «безумцем»: «Я надеюсь, что никто не воспользуется моими мыслями, высказанными устно или письменно, чтобы подкреплять сказки о духах или привидениях». Mach E., *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, op. cit., ch. IV, para. IV-10.

<sup>11</sup>Стоит лишь обратить внимание на это различие, как оно тут же бросается в глаза при чтении статей Эйнштейна того периода.

## Еще немного математики, но в последний раз. . .

### Перечитаем Гаусса

В Венском университете Фридрих Коттлер (1886–1965) с удовольствием перечитывает свою первую, только что опубликованную статью «О мировых линиях в мире Минковского».<sup>1</sup> У него есть все основания гордиться собой, потому как он понимает, что сумел обойти конкурентов — Зоммерфельда, фон Лауэ, Эйнштейна и других, первым обнаружив новые математические методы, необходимые для продвижения вперед в изучении теории относительности. Проследим же, как он пришел к своим результатам, основанным на работах, сделанных Гауссом в Геттингене почти столетием ранее. . .

В 1821 году Гаусс назначен научным советником по составлению земельного кадастра при правительстве Дании и Ганновера, к ведению которого относился тогда Геттинген. И перед ним тут же поставлена задача: определить для кадастра площадь неровных бугристых земель. Гаусс создает *дифференциальную геометрию* — метод определения свойств поверхности в непосредственной близости от некой точки, позволяющий при оценке расстояний пренебрегать членами порядка выше второго. Как можно догадаться, это именно тот тип геометрии, который требуется для перехода от одной точки пространства-времени к *любой* другой расположенной рядом точке. . .

Рассмотрим же дифференциальную геометрию подробнее. На любой заданной поверхности начертим прямоугольный треугольник *бесконечно малых* размеров. Обозначим его гипотенузу через  $ds$ , а катеты через  $dx_1$  и  $dx_2$  (символ  $d$  означает, что соответствующие длины бесконечно малы, иначе говоря, есть *дифференциалы*<sup>2</sup>) и, следуя Гауссу, рассмотрим общую квадратичную форму  $ds^2 = Adx_1^2 + 2Edx_1dx_2 + Bdx_2^2$ , где  $A$ ,  $B$  и  $E$  есть некие числа. Эта форма, согласно Гауссу, позволяет установить теорему Пифагора, даже если поверхность, на которой изображен треугольник, имеет «кривизну». Посмотрим, о чем идет речь. . .

Случай первый: поверхность плоская. Теорема Пифагора записывается в виде  $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2$ , поскольку в этом случае  $A = 1$ ,  $B = 1$ ,  $E = 0$ .

Случай второй: поверхность имеет кривизну (например, это поверхность сферы). Катеты и гипотенуза треугольника искривлены и теорема Пифагора в ее привычном виде неприменима. Нужно взять  $A$  и  $B$  отличными от 1, а  $E$  отличным от 0, тогда, согласно Гауссу, теорема будет снова справедлива. Это — фундаментальная гипотеза дифференциальной геометрии.<sup>3</sup>

Теперь в квадратичной форме Гаусса вместо  $A$ ,  $B$  и  $E$  используются более наглядные и удобные для вычислений величины  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{22}$ . В результате, формула Гаусса записывается в виде  $ds^2 = g_{11}dx_1^2 + 2g_{12}dx_1dx_2 + g_{22}dx_2^2$ .

Сделаем последний шаг в рассмотрении этой формулы. Сейчас ее принято записывать в «сокращенном» виде  $ds^2 = g_{ij}dx_idx_j$ , при этом предполагается, что когда индекс присутствует в формуле дважды (это справедливо для  $i$  и  $j$ ), по нему производится суммирование по всем допустимым значениям. В случае нашего треугольника,  $i$  и  $j$  принимают значение 1 и 2. Читатель может легко убедиться в справедливости такой договоренности.<sup>4</sup>



Прежде чем ненадолго покинуть этот предмет, познакомимся еще с некоторыми терминами, которые используют математики в дифференциальной геометрии. Говорят, что  $ds$  представляет собой *линейный элемент*, или *бесконечно малый элемент* (Минковский), или *квадратичный дифференциал*, ансамбль «коэффициентов»  $g_{ij}$  представляет собой *метрику* данной поверхности, а  $g_{ij}$  есть ее компоненты.

Подведем итог. Для любой заданной поверхности, если компоненты метрики имеют значения  $g_{11} = 1, g_{22} = 1$  и  $g_{12} = g_{21} = 0$ , теорема Пифагора справедлива в своем привычном виде, то есть поверхность плоская. Верно и обратное: если поверхность плоская, теорема Пифагора справедлива в привычном виде. В общем виде: если компоненты  $g_{ij}$  имеют указанные выше значения в соседних точках поверхности, эта поверхность в данном месте плоская. Если же компоненты в соседних точках имеют другие значения, поверхность «обладает кривизной» (справедливо и обратное утверждение).<sup>5</sup>

## От Гаусса к Риману

По случаю экзамена на вступление в должность на философском факультете Геттингенского университета, 10 июня 1854 г. (в этом году родился Пуанкаре), Бернгард Риман представляет свою работу «Гипотезы, лежащие в основании геометрии».\* Это — его «Эрлангенская программа».

В этой работе Риман объясняет, что понятия «прямой», «поверхности» и «пространства» обычной геометрии есть частные случаи более общих понятий, которые — в духе написанных по латыни трудов Гаусса, где он называл их *varietas* — Риман назвал «многообразиями точек».<sup>6</sup> Согласно такому представлению, прямая есть одномерное многообразие, поверхность — двумерное, обычное пространство — многообразие трехмерное, а пространство-время — четырехмерное многообразие. . .

Преимущество такого подхода в том, что формула Гаусса  $ds^2 = g_{ij}dx_i dx_j$  немедленно применима к любому многообразию, если вместо двух измерений — поверхности в обычной геометрии — рассматривать, например, четыре измерения. Для этого достаточно позволить индексам  $i$  и  $j$  пробегать значения от 1 до 4, и тогда формула Гаусса задает метрику четырехмерного пространства.

Прежде чем расстаться с Риманом, процитируем еще две ключевые фразы из его работы. Рассматривая «метрические» соотношения, которые применимы к многообразиям  $n$  измерений, он замечает: «Многообразия, в которых [квадрат] линейного элемента может, как на плоскости, так и в пространстве, быть сведен к сумме квадратов  $dx^2$  [...] заслуживают специального названия — «плоских многообразий».<sup>7</sup> За этим замечанием следует предсказание, которое подвигает нас продолжать повествование: «Совершенно законно предположить, что метрические соотношения пространства в бесконечно малом не будут соответствовать гипотезам геометрии [он имеет в виду евклидову геометрию], и это придется признать, как только будет найдено более простое объяснение известных явлений». Именно это математики ранга Минковского и Борна и осмелятся вскоре предпринять.<sup>8</sup>

\* Приводится в сборнике «Альберт Эйнштейн и теория гравитации», М. Мир, 1979. — (прим. перев.)

## Величины $g_{ij}$ описывают гравитационное поле

В Геттингене и в других местах, вдохновленные успехом Минковского, многие молодые математики увлекаются физикой. Они задаются вопросом: а что если позволить величинам  $g_{ij}$  квадратичного дифференциала  $ds^2$  принимать значения отличные от тех, которые допускаются пространством-временем Пуанкаре?

Идея быстро овладевает умами, но представляет значительные трудности — позволить величинам  $g_{ij}$  принимать значения отличные от тех, которые допускаются пространством-временем Пуанкаре, означает, что оно может иметь кривизну. Но что может его искривлять?

Для тех, кто как Эйнштейн, занимается разработкой теории, которая описывает только тяготение, ответ звучит так: «Функции  $g_{ij}$  описывают как метрику пространственно-временного континуума, так и гравитационное поле».

Двоякая роль, которую играют величины  $g_{ij}$ , представляет собой значительное новшество. Эта идея одновременно и очень соблазнительна и отвратительна. Соблазнительна она потому, что предлагает механизм, позволяющий деформировать пространство-время. При таком подходе, гравитационное поле — и только оно! — ответственно за «искривленную» геометрию пространства-времени.

Но именно поэтому эта идея «отвратительна»! Такой подход делает гравитационное поле выделенным, отличным от всех других действующих в природе сил. . . Но почему? По какому праву?

Более того, здесь же таится и подвох.

Искривленное пространство-время не допускает группы перемещений обычной геометрии; то есть в нем не допускается наличие «тяготеющих масс». Это приводит к следующему положению: мы исходим из наличия масс, создающих гравитационное поле. Это поле вызывает искривление пространства-времени. Но как только пространство-время обретает кривизну, оно не допускает присутствия тех самых масс, которые вызвали искривление! Отсюда вытекает необходимость изначально вводить массы (частицы, Солнце, Землю. . .), исходя из «гидродинамической» модели, то есть в виде непрерывной среды, типа протертого супа!

У математика такая необходимость не вызывает никаких затруднений, но для физика, с самого начала озабоченного соответствием «реальности», это равнозначно катастрофе. Ему приходится как-то выкручиваться, ведь никакое другое подходящее решение не приходит в голову. Посмотрим теперь, как ситуация выглядит с точки зрения математики.

Объекты, с которыми мы сталкиваемся в обычном трехмерном пространстве, имеют три измерения — длину, ширину и высоту. Имеется, однако, и другая категория объектов (если использовать это слово в самом широком смысле), которые имеют не три, а  $3 \times 3 = 9$  измерений в обычном пространстве — например, электрическая поляризация кристалла. Этот «объект» нельзя поддержать в руках, но его можно изучать измерительными приборами, определять его свойства и проверить, сколько у него измерений. Оказывается, что их девять, и это экспериментальный факт.<sup>9</sup> То же справедливо и для «супа», который нужно придумать, чтобы описать распределение масс и энергии в общей теории относительности. Соответствующий «объект» имеет там  $4 \times 4 = 16$  измерений в пространстве-времени.

Редкая удача! Для описания таких объектов физики уже придумали подходящий инструмент — тензор.<sup>10</sup> Обозначим через  $E$  тензор, описывающий «суп», образованный распределением масс и энергии во Вселенной. Будем теперь искать уравнение вида  $G = E$ , где справа будет считающийся известным тензор, а слева — тензор  $G$ , представляющий структуру гравитационного поля (а, значит, и метрику), созданного в пространстве-времени массой и энергией  $E$ .

Теоретический подход выглядит так: задаем  $E$ , используем «тензорное» уравнение  $G = E$ , чтобы вычислить  $G$ ; зная  $G$ , мы определим, согласно такому подходу, все что только можно узнать о пространстве-времени, то есть о его геометрии. Затем, мысленно поместим в определенное таким образом пространство-время «пробную частицу»<sup>11</sup> и вычислим ее траекторию. Результат должен быть справедлив как для расчета траектории планет, так и для элементарных частиц. Забегая вперед, скажем, что такой подход работает только для планет. Что же касается элементарных частиц, то на данном этапе развития физики такой расчет не приводит абсолютно ни к чему!

Остается потребовать, чтобы наше тензорное уравнение удовлетворяло также критерию общей ковариантности.

## Драматический момент

Вернемся к Эйнштейну. Гроссман спрашивает, какую форму нужно придать тензорному уравнению общей теории относительности. Эйнштейн, не задумываясь, отвечает: какая бы ни была форма, она должна сводиться к классическому уравнению Пуассона в случае статического гравитационного поля или когда поле мало по величине.

Запишем уравнение Пуассона. Оно гласит, что масса плотности  $\rho$  создает в пространстве гравитационный потенциал  $\varphi$ , задаваемый выражением  $\varphi = 4\pi\rho$ . Ничего не может быть проще.

Прекрасно, но гравитационный потенциал Пуассона есть скаляр, то есть у него есть только одна компонента, в то время как гравитационный потенциал в тензорном уравнении, предложенном Гроссманом, содержит шестнадцать ( $4 \times 4$ ) компонент.<sup>12</sup>

Эйнштейн вспоминает, что он уже установил (или полагал, что установил) фундаментальную характеристику действия *статического*<sup>13</sup> гравитационного поля или же *очень слабого* поля. Он предлагает Гроссману использовать эту характеристику, чтобы перейти от шестнадцати компонент к одной. Вот здесь в его рассуждения и вкрадывается маленькая ошибка, которая затормозит всю работу. Рассмотрим подробнее в чем было дело.

В исходном виде фундаментальный инвариант Пуанкаре записывается так:  $dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$  (где для ясности дальнейшего изложения восстановлено  $c$ ). Эйнштейн объяснил Гроссману, что записанный таким образом квадратичный инвариант остается справедливым и в случае статического гравитационного поля с той лишь разницей, что  $c^2$  есть теперь функция пространственных координат (поскольку, по его мнению, скорость света изменяется в присутствии поля).

Гроссман тут же предлагает использовать единственный тензор, который, похоже, удовлетворяет таким требованиям — *тензор Риччи* (названный в честь его открывателя итальянского математика Грегорио Риччи-

Курбастро). Он применяет полученное с помощью этого тензора уравнение для случая очень слабого и статического гравитационного поля. Следует ли из него «фундаментальная характеристика» Эйнштейна?

Нет! Драматический момент. Уверен ли Эйнштейн в своей правоте?

Да. «Физическая интуиция» подсказывает ему, что для статического или слабого гравитационного поля пространство–время обязано быть *пространственно* «плоским». <sup>14</sup> Если тензор Риччи не позволяет получить такой результат, ему не место в теории. Сказано — сделано. Не оправдавший ожиданий тензор к огромному сожалению Гроссмана изгоняется. А ведь это был правильный тензор! <sup>15</sup> Но и это не все. Эйнштейн обнаруживает «неоспоримое доказательство» того, что теория, которую он пытается построить, не может быть полностью ковариантной.

## Принцип единственности

Но на чем же основывалось это «доказательство» Эйнштейна, разрушавшее все его надежды? Зачарованные личностью Эйнштейна и окутывавшими его мифами биографы, даже самые лучшие, <sup>16</sup> упускали из виду не всегда ясные, но в то же время прослеживаемые основы некоторых из его идей. Никто из них не упоминает, например, Йозефа Петцольда. И напрасно. . .

Частный преподаватель Высшей технической школы Шарлоттенбург в Берлине, Петцольд еще в 1895 году сформулировал свой «закон единственности», согласно которому физическая теория только тогда становится приемлемой, когда она дает единственную модель реальности. Он написал множество статей пропагандирующих релятивистский позитивизм, и его идеи повлияли на Эйнштейна во время создания им своей теории.

«Представления какого-либо события в системах отсчета, которые можно единственным образом преобразовывать одна в другую, — писал Петцольд, — есть представления того же самого события. Понятие единственности должно быть определено, то есть оно не задано *a priori*». <sup>17</sup> В ответ Эйнштейн пишет ему: «Сегодня я целиком и с большим интересом прочел Вашу книгу. И пришел к выводу, что я Ваш попутчик с давних пор. . . ». <sup>18</sup>

Во время создания своей теории Эйнштейн встречается с Петцольдом и основывает вместе с ним «Общество позитивистской философии», которое ставит целью совместить свои идеи с идеями Маха, критикуя метафизическое понятие вещества. Эйнштейн кладет «закон единственности» в основу своих рассуждений, <sup>19</sup> однако, совершенно неожиданно этот закон высказывает перед ним, как чёртик из табакерки.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Kottler F., «Über die Raumzeitlinien der Minkowski'schen Welt», *Sitzungsberichte, Akademie der Wissenschaften, Wien, math.-nat. Klasse, Part IIa*, vol. CXXI, 1912, p. 1659. Прочитав среди прочих эту работу, Гроссман познакомился с методами «векторного исчисления», которые он позднее использовал, помогая Эйнштейну. Коттлер, в свою очередь, позаимствовал некоторые идеи у своего современника Джозефа Райта (Joseph Wright). Блестящая, но короткая карьера Райта заслуживает нескольких слов. Уроженец Ливерпуля Джозеф Эдмунд Райт (1878–1910) получил образование в столь дорогом сердцу

Ньютона Тринити-колледже в Кембридже, а затем эмигрировал в США. Умер он в возрасте 31 года, опубликовав ряд поразительных статей (всего их было одиннадцать), позволяющих назвать его Эваристом Галуа инвариантов. Первые две статьи — *О дифференциальных инвариантах* и *О дифференциальных инвариантах пространства* — полностью вписываются в идеи Пуанкаре об относительности. Райт развивает представление о том, что всякий инвариант должен считаться принадлежащим некой группе преобразований. В последней статье «Соответствующие динамические системы», опубликованной за несколько недель до смерти, он подчеркивает возможное динамическое применение этой теории. Одиннадцать статей Райта были опубликованы в восьмом томе Monographs Reprint Series Брин Мор колледжа штата Пенсильвания, где он был профессором с 1904 по 1910 годы. Его работа «Инварианты квадратичных дифференциальных форм» (“Invariants of Quadratic Differential Forms”, *Cambridge Tractats in Mathematics and Mathematical Physics*, No. 9, Cambridge University Press, 1908) была для Коттлера настольной книгой, которую он неоднократно цитировал в своей статье.

<sup>2</sup>Для целей нашего рассмотрения эти термины эквивалентны.

<sup>3</sup>Gauss F., «Disquisitiones generales circa superficies curvas», *Commentationes Societatis*, Classis math., vol. VI, 1828, p. 99. Чтобы более наглядно представить себе, о чем идет речь, рассмотрим прямоугольный треугольник с катетами  $dx_1 = 1$  и  $dx_2 = 1$ . На плоской поверхности теорема Пифагора дает  $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 = 1^2 + 1^2 = 2$ , откуда гипотенуза есть  $\sqrt{2}$ . Если треугольник изображен на искривленной поверхности, катеты и гипотенуза искривлены, и гипотенуза более не равна  $\sqrt{2}$ . Предположим, что в том месте, где начерчен треугольник, дифференциальный элемент поверхности задается выражением  $ds^2 = 0.8dx_1^2 + 0.2dx_1dx_2 + 0.8dx_2^2$ . Отсюда получается, что  $ds = \sqrt{1.8}$ . Гипотенуза теперь короче, чем в предыдущем случае. В общем случае, чтобы получить «правильный» результат, величинам  $A$ ,  $B$  и  $E$  следует приписать значения, зависящие от «меры кривизны» рассматриваемой поверхности. Гаусс показывает это в своей знаменитой *theorema egregium*, где он использует термин *invariata* (то что теперь называется «инвариантом»), чтобы продемонстрировать, что этот инвариант есть присущая данной точке «мера кривизны».

<sup>4</sup>Эта договоренность была предложена Эйнштейном в 1916 г. Он шутливо говорил, что это был его единственный вклад в математику.

<sup>5</sup>Вернемся на минуту к случаю капли, свободно падающей в поле тяготения Земли. В отсутствие гравитационных эффектов, в начале падения капля имела бы сферическую форму (без учета эффектов поверхностного натяжения и т.п.), и ее поверхность имела бы кривизну одинаковую на всей поверхности. Но по мере падения капли, приливные эффекты изменяли бы ее кривизну, вследствие чего величина  $g_{ij}$ , представляющая бесконечно малый элемент этой поверхности, изменялась бы от точки к точке. Именно по этой причине принцип эквивалентности не может строго применяться в данном случае.

<sup>6</sup>*Mannigfaltigkeit* по-немецки, *manifold* по-английски.

<sup>7</sup>«Простейший случай, — пишет далее Риман, — это многообразия, в которых линейный элемент выражается корнем четвертой степени дифференциального выражения четвертой степени».

<sup>8</sup>Через неделю после выступления Римана, 16 июня 1854 г., Гаусс садится в конную повозку и отправляется инспектировать строящуюся железную дорогу Геттинген–Кассель. Лошади понесли, коляска перевернулась и Гаусс очень сильно ушибся. Оправившись, 31 июля он принял участие в праздничной церемонии пуска этой дороги, но вскоре заболел водянкой и через год умер. Сменил его на кафедре математики Густав Лежен–Дирихле, но тот тоже скончался в 1859 г. Кафедру занял тридцатитрехлетний Риман, но, увы, ненадолго. Он заболел, уехал в Италию, где и скончался 20 июля 1866 г. в возрасте 39 лет.

<sup>9</sup>В общем случае, электрическая поляризация кристалла проявляется не только в направлении создающего его электрического поля. Поэтому, в каждом из возможных направлений нужно рассматривать три компоненты, чтобы описать результирующую поляризацию, что и дает  $3 \times 3 = 9$  компонент.

<sup>10</sup>Термин «тензор» введен в физику в 1898 году Вольдемаром Фогтом, который преподавал тогда в Геттингене кристаллографию. Деформация кристалла предполагает наличие в нем внутренних напряжений (tensions), откуда и происходит наименование «тензор». В обычном пространстве тензор второго ранга имеет  $3 \times 3 = 9$  компонент. В общем случае, тензор ранга  $n$  имеет в пространстве  $N$  измерений  $N^n$  компонент. Интересующие нас тензоры есть тензоры второго ранга в пространстве четырех измерений и имеют  $4 \times 4 = 16$  компонент, из которых только 10 независимы, поскольку из соображений симметрии  $g_{ij} = g_{ji}$ .

<sup>11</sup>Подразумевается тело, не вносящее существенных изменений в метрику пространства–времени.

<sup>12</sup>Шестнадцать компонент сводятся к десяти, если предположить, что метрика пространства–времени симметрична, то есть, что  $g_{ij} = g_{ji}$ . Но проблема остается — как сделать из десяти компонент одну. . .

<sup>13</sup>То есть оно не изменяется во времени. Таково, например, гравитационное поле у поверхности Земли.

<sup>14</sup>Обладает кривизной только по отношению к временной координате. На самом деле это не так: фундаментальный инвариант не имеет такого простого вида даже в случае очень слабого статического поля. Этот неверный вывод вызвал у Эйнштейна наиболее серьезные трудности при дальнейшей разработке его теории.

<sup>15</sup>Использование тензора Риччи для описания очень слабого статического поля приводит к выводу, что скорость света в данном случае есть линейная функция пространственных координат, что с точки зрения Эйнштейна было неприемлемо.

<sup>16</sup>Абрахам Пайс, Жак Мерло-Понти, Филип Франк, Франсуаз Балибар, Денис Брайан. . .

<sup>17</sup>Petzoldt J., “Die Relativitätstheorie im erkenntnistheoretischen Zusammenhang des relativistischen Positivismus”, *Deutch Physikalische Gessellschaft, Verhandlungen*, vol. XIV, 1912, p. 1055.

<sup>18</sup>В труде Маха *Механика* можно встретить многочисленные ссылки на Петцольда. Мах, например, пишет: «Даже Петцольд лишь частично выводит закон инерции из опыта, но с другой стороны, он считает его заданным принципом определения единственности. Я не склонен возражать Петцольду. . . ».

<sup>19</sup>См., например, исследование, посвященное этому вопросу: Don Howard, John D. Norton, *Einstein Studies*, Boston, Birkhauser, vol. V, 1993, p. 51.

## Чёртик в дыре дурачит Эйнштейна

### Что делать?

В 1915 г. в письме Лоренцу Эйнштейн рассказывает о проблеме с «чёртом». «Физик-теоретик может ошибаться по двум причинам: либо его водит за нос чёрт (и в таком случае он достоин жалости), либо его подход ошибочен и смешон (в таком случае его следует поколотить)». <sup>1</sup> В каком же положении он сам находился в 1913 году?

Эйнштейн дал четыре версии <sup>2</sup> того, как он столкнулся с «чёртиком в дыре» в том году. Вот что он изложил в четвертой, наиболее точной версии. <sup>3</sup>

Пусть имеется область континуума  $L$ , «в которой не происходят какие-либо материальные процессы», то есть нет ни энергии, ни вещества. Физические параметры внутри такой «дыры» полностью определены, если известна метрика континуума в этой дыре, заданная как функция координат  $x_j$  в используемой для описания системе координат  $K$ . Эйнштейн обозначает ансамбль таких функций через  $G(x)$ .

Он вводит вторую систему координат  $K'$ , которая совпадает с системой  $K$  вне дыры, но отличается от нее внутри дыры так, что «относительно этой системы  $K'$  величины  $g'_{ij}$  всюду непрерывны». Он обозначает ансамбль этих  $g'_{ij}$  символом  $G'(x')$ .  $G'(x')$  и  $G(x)$  описывают, таким образом, «само гравитационное поле».

И тут наступает катастрофа! Эйнштейн объясняет почему: «Выразим входящие в  $g'_{ij}$  координаты  $x'_j$  через координаты  $x_j$ , т. е. образуем  $G'(x)$ , тогда  $G'(x)$ , равным образом, будет описывать гравитационное поле относительно системы  $K$ , которое, однако, не совпадает с имеющимся [...] гравитационным полем».

*Однако, не совпадает...!* Это противоречит непогрешимому принципу единственности Петцольда! «Таким образом, — утверждает Эйнштейн, — для общековариантных дифференциальных уравнений гравитационного поля последовательность событий может быть неоднозначной». <sup>4</sup>

В самом деле, если положить, согласно Эйнштейну, что дифференциальные уравнения гравитационного поля «общековариантны», то они удовлетворяются  $G'(x')$  в системе  $K'$ , если они удовлетворяются  $G(x)$  в системе  $K$ . Но они также удовлетворяются и  $G'(x)$  в системе  $K$ . Отсюда следует, что в системе  $K$  имеются два решения —  $G(x)$  и  $G'(x)$ , отличные друг от друга, хотя условия на границе дыры одни и те же в обоих случаях, а это противоречит принципу единственности.

Отсюда с неизбежностью следует вывод: «Если мы потребуем, чтобы развитие событий в гравитационном поле полностью определялось устанавливаемыми законами, то необходимо ограничить выбор координатных систем таким образом, чтобы было невозможно ввести новую систему координат  $K'$  описанного выше вида без того, чтобы не нарушить введенного ограничения. Продолжение координатной системы внутри некоторой области  $L$  не может быть произвольным». Иными словами, в этой дыре сидит чёртик!

Исходя из поля  $G$  в системе  $K$ , он строит в той же системе второе поле  $G'$ , *отличное* от первого, что неприемлемо для сторонника принципа единственности. Но что же делает Эйнштейн, чтобы получить поле  $G'$ ? Именно здесь «чёртик дурачит его». Чтобы получить  $G'$ , нужно подвергнуть кон-

тинуум преобразованию, в результате которого каждой точке континуума соответствовала бы другая точка того же континуума (это называется точечным преобразованием). Но ведь преобразование пространства есть операция чисто математическая, она не меняет ничего с *физической* точки зрения. Эта операция ставит в соответствие каждой точке пространства другую точку того же пространства, то есть каждому (состоящему из точек) объекту пространства ставится в соответствие другой объект-образ (также состоящий из точек).

Преобразованный объект, возможно, выглядит иначе, но это тот же объект. Лицо в вогнутом увеличивающем зеркале выглядит иначе, чем оригинал, но это отражение *того же* лица. Такое преобразование охватывает *все точки пространства и все содержащиеся в нем объекты*. В частности, преобразование охватывает и поле; оно, возможно, даже его, казалось бы, деформирует, но это *не другое* поле.<sup>5</sup> Одним словом, точки континуума не существуют отдельно от точек поля. Представленные одними и теми же величинами  $g_{ij}$ , континуум и поле есть одно и то же!

Лишь спустя три года, в 1915 году, это и объяснят Эйнштейну сначала ученик Гильберта, а потом и сам Гильберт.

## Эйнштейн избран членом Прусской Академии наук

В результате неурядиц в семейной жизни — на фоне упорной совместной с Марселем Гроссманом работы над общей теорией относительности — Эйнштейн решает вскоре покинуть Цюрих и обосноваться... в Берлине. Такая идея приходит в голову не ему одному. Фриц Хабер, профессор химии Берлинского университета, 4 января 1913 г. пишет письмо Хуго Крюссу, чиновнику Прусского министерства образования, предлагая ему административные и финансовые условия, на которых можно было бы «привлечь в Берлин выдающегося д-ра Альберта Эйнштейна». Берлинские родственники Эйнштейна тоже приходят в возбуждение, хотя и потихоньку — к своему 34-летию, 14 марта 1913 г., кузина Эльза просит Эйнштейна прислать фотографию и «популярную книгу по теории относительности».

Богатый финансист Леопольд Коппель, друг Фрица Хабера, предлагает платить Эйнштейну из своего кармана гарантированное жалование в размере 6,000 марок в год в течение двенадцати лет. Четыре члена Прусской Академии наук, профессора Планк, Нернст, Рубенс и Варбург, которым Эйнштейн инкогнито нанес визит несколькими месяцами раньше, тут же начинают заниматься этим делом всерьез. Макс Планк 12 июня лично зачитывает перед математической секцией Академии предложение выбрать А. Эйнштейна «несмотря на его юный возраст» членом императорской Прусской академии наук. Он заявляет:

«Его имя стало известным, в основном, благодаря принципу относительности, предложенному им в знаменитой статье об электродинамике движущихся тел, принципу, согласно которому противоречие между теорией стационарного эфира Лоренца и экспериментально проверенными электродинамическими и оптическими процессами, указывающими, что наземные движения не зависят от движения Земли, объясняется тем фактом, что наблюдатель, увлекаемый движением Земли, измеряет время иначе, чем наблюдатель, находящийся в покое в гелиоцентрической системе. Революционные последствия такого нового подхода, распространенные на всю фи-



зику, и прежде всего на механику и далее, и глубоко основывающиеся на теории познания, были впоследствии сформулированы математиком Минковским так, чтобы придать всей физике новый объединенный характер, исходя из того, что временное измерение приобретает вид полностью эквивалентный пространственным измерениям».<sup>6</sup>

Планк, однако, спешит отметить: «Конечно, иногда др. Эйнштейн заходит в своих предположениях слишком далеко. . . », но поскольку он в целом хороший парень, «это не следует ставить ему в упрек, так как даже в точных науках, не рискуя, нельзя добиться по-настоящему новых результатов».

А почему бы этому мэтру немецкой физики не сказать с трибуны Прусской Академии наук что-нибудь вроде следующего: «Рекомендую вам избрать господина Эйнштейна. Поклонник философа Баруха Спинозы, он постоянно пребывает в поиске “истинных идей”, которые чаще всего черпает в трудах других, и которые он пытается *четко отградить от прочих* в надежде обнаружить *мощь и абсолютную строгость*. Навыки, приобретенные им за время работы экспертом в Бернском патентном бюро, переросли в талант, необходимый для такого трудного дела. Он обнаружил в фундаментальных трудах Анри Пуанкаре жемчужину — “принцип относительности”, и умело ее извлек»?

## Посиделки у Эйнштейна в Цюрихе

В конце мая или в начале июня 1913 г. происходит событие, окутанное покровом тайны. В Цюрих к Эйнштейну приезжают супруги Эренфест. На следующий день Эйнштейн с другом отправляется на прогулку в горы. Сидя на поваленном дереве, они обсуждают трудности в работе Эйнштейна. Мишель Бессо, который в то время работал в Триесте, разрабатывая, помимо прочего,<sup>7</sup> план водоснабжения этого города, взял короткий отпуск и тоже отправился в Цюрих. Туда же вскорости прибыл и Густав Ми.

Из того, что обсуждалось этой группой на ежедневных собраниях на Хофштрассе 116 известно лишь следующее: Бессо с Эйнштейном пытались воспроизвести результат формулы смещения перигелия Меркурия Герберга, используя предварительные разработки теории тяготения Эйнштейна и Гроссмана. Возможно, под влиянием взглядов Пуанкаре, двое друзей надеялись на то, что полученные результаты совпадут с данными наблюдений и тем «докажут» справедливость теории.

Благодаря Бессо, бережно сохранившему их, эти записи<sup>8</sup> и позволяют восстановить основные этапы рассуждений:

1. Исходя из новой теории, Эйнштейн строит приблизительную метрику, соответствующую полю тяготения Солнца, как материальной точки с массой  $M$ .
2. Бессо выводит уравнение, описывающее смещение перигелия планеты, рассматриваемой как материальная точка массы  $m$ , движущаяся в поле тяготения, соответствующем этой метрике.
3. Эйнштейн получает отсюда выражение для смещения перигелия, выраженное в долях  $\pi$  для полуоборота.
4. Бессо подправляет это выражение, оставляя лишь величины, соответствующие известным количественным показателям.

5. Эйнштейн и Бессо подставляют эти значения в выражение смещения перигелия и обнаруживают, что смещение должно составлять... 1821 дуговую секунду, т.е. примерно 30 дуговых *минут* вместо нужных 43 секунд! Колоссальный перебор!
6. Бессо обнаруживает, что Эйнштейн принял массу Солнца вдвое большей, чем следовало. После обнаружения ошибки оказывается, что смещение составляет... лишь 18 дуговых секунд — на этот раз слишком мало.
7. Бессо уезжает к себе, но через несколько дней возвращается в Цюрих, чтобы продолжить вычисления, но напрасно. Получаемые результаты никуда не годятся.
8. Раздосадованный Эйнштейн запирает рукопись в ящик и забывает о ней, точно так же, как он забывает о разработанной с Гроссманом теории, легшей в основу расчетов.

У этой истории, про первые этапы которой я рассказал, было и продолжение. Примерно через год голландский физик Йоханнес Дросте заново проделал те же вычисления и получил... тот же результат, что и Бессо с Эйнштейном — 18 дуговых секунд. Эйнштейн, к тому времени уже постоянно обосновавшийся в Берлине, достал из ящика рукопись вычислений и послал ее Бессо, попросив «улучшить» их, если возможно.

Бессо принялся за работу, улучшая расчеты и совершенствуя используемые методы. Одну копию он посылает Эйнштейну, а оригинал оставляет у себя. Спустя год Эйнштейн «вызволит из небытия» эти расчеты и, как мы увидим, они произведут неизгладимое впечатление.

У этих посиделок был и другой результат: восхищение Эренфеста Эйнштейном возросло неизмеримо. В его дневнике есть запись от 25 июня: «День без Эйнштейна»!<sup>9</sup>

## Эйнштейн пишет Маху

В то время, как Эренфест 25 июня страдает без Эйнштейна, тот пишет Маху письмо, полное энтузиазма. «Во время солнечного затмения в будущем году мы узнаем, отклоняются ли лучи света Солнцем... Если да, то Ваш блестящий анализ основ механики получил бы прекрасное подтверждение. Из него с необходимостью вытекает, что в основе инерции лежит взаимодействие с [удаленными] телами, что Вы и предсказали»...

Здесь очень четко проявляется отличие Эйнштейна от прочих физиков, занимавшихся той же проблемой. Они все озабочены *математическим* построением новой теории; один лишь Эйнштейн хотел бы получить экспериментальные подтверждения. Одним из таких подтверждений было бы искривление лучей света при прохождении около массивного тела, например, Солнца. Он основывает это предсказание на небольшом расчете, который, по его мнению, показывает, что в гравитационном поле скорость света не есть более  $c$ , а  $c$ , умноженное на  $1 + \varphi/c^2$ , где  $\varphi$  представляет гравитационное поле.<sup>10</sup> Если  $G$  есть гравитационная постоянная Ньютона,  $M$  — масса звезды, а  $D$  — расстояние между траекторией света и звездой, около которой он проходит, то, согласно его расчетам, угол отклонения равен  $2GM/Dc^2$ . Эйнштейн убежден в правильности этой формулы.

В пятницу 11 июля, Планк и Нернст с супругами садятся в ночной поезд, отправляющийся в Цюрих. Они везут хорошую новость: Прусская академия наук проголосовала за его избрание. Спустя два дня они (конфиденциально) делают тройное предложение: ему предлагается пост в Академии, место в Берлинском университете (без обязательного преподавания!) и, в довершение всего, пост директора в создаваемом специально для него институте теоретической физики по типу Института Кайзера Вильгельма Фрица Хабера, где как директор он сможет нанимать оплачиваемых ассистентов.<sup>11</sup>

Эйнштейн на седьмом небе! У него создается впечатление, что Макс Планк ничего не забыл, но все простил. С Вальтером Нернстом Эйнштейн обменялся шутками. Он пересказал тому фразу Ланжевена, будто бы во всем мире лишь дюжина человек понимает теорию относительности, на что Нернст, с прусской галантностью, ответил: «И восемь из них в Берлине».<sup>12</sup> Было ясно, что они найдут общий язык. Эйнштейн, тем не менее, просит ему дать время подумать. Он даст ответ при отъезде гостей в Берлин в следующий понедельник.

В указанный час он появляется на цюрихском вокзале. Планк и Нернст уже садятся в поезд, и тогда Эйнштейн достает из кармана белый платок — это знак согласия! Планк и Нернст могут отправляться домой с чувством выполненного долга.

Двадцатью голосами «за» при двух «против» 24 июля Эйнштейна избирают членом Прусской Академии наук... Правда, требуется еще согласие императора. Но он его даст.<sup>13</sup>

## Горький привкус и поворот на 180 градусов

Полученный совместно с Гроссманом результат сначала оставляет у Эйнштейна горький привкус. Он пишет Лоренцу: «Уравнения гравитационного поля не обладают общей ковариантностью. Если лишь некоторые из уравнений теории обладают таким свойством, теория противоречит своим исходным положениям и больше не основывается ни на чем».

Несмотря на это, он остается «махистом». Он утверждает: «Кстати, из этих уравнений следует относительность инертной массы [в соответствии] с тем, что так изящно показал Мах в своей критике *Principia* Ньютона».<sup>14</sup> В результате, он решает «сделать хорошую мину при плохой игре».

С точки зрения теории познания, полный отход Эйнштейна от прежних взглядов, поворот на 180 градусов, очень интересен. Он пишет своему другу Эренфесту, который теперь работает с Лоренцом и которого он вскоре сменит. «Я внутренне убежден, что открыл истину, и что она вызовет ропот возмущения среди коллег, которые прочитают мою статью».<sup>15</sup> И далее: «Проблема тяготения разрешена к моему полному удовлетворению... Можно показать, что *общековариантные* уравнения, способные полностью определить поле, существовать не могут».<sup>16</sup> После чего, дабы еще усугубить положение, он добавляет: «Законы сохранения энергии определяют среди всех возможных систем координат некоторые выделенные системы, между которыми допустимы линейные преобразования». И делает вывод: «Можно ли вообразить себе что-либо более красивое, чем это выделение, с необходимостью вытекающее из законов сохранения?»

Считая установленным раз и навсегда (установленным им самим) то, что относительность справедлива лишь в некоторых выделенных системах,

он пытается насаждать эту точку зрения среди математиков. Отныне он начинает возвещать ее как «благую весть» и несет ее по городам и весям, проповедуя всем, кто готов его слушать.

9 сентября 1913 г. он публикует в научном швейцарской журнале короткую заметку,<sup>17</sup> в которой резюмирует свои идеи.

1. Один из самых замечательных опытных фактов физики заключается в том, что обе массы, инертная и тяжелая, по своей величине в точности равны;
2. В отношении действия на механические и другие физические явления поле тяжести можно заменить ускоренным состоянием тела отсчета (системы координат);
3. Следствием гипотезы эквивалентности является искривление световых лучей в поле тяготения; для луча, проходящего мимо Солнца, это искривление составляет 0,84 дуговой секунды;<sup>18</sup>
4. Искривление световых лучей означает, что скорость света не постоянна, но зависит от места. Поэтому становится необходимым обобщить теорию пространства и времени, известную под названием теории относительности, поскольку последняя основана на постулате о постоянстве о скорости света;
5. В новой теории гравитационное поле определяется симметричным тензором  $g_{ij}$  с десятью компонентами. Выражение  $g_{ij}dx_idx_j$  есть фундаментальный инвариант.

Он указывает также те ограничения, которые по причинам фундаментального характера должны применяться к теории:

1. Оказывается логически невозможным установить уравнения для  $g_{ij}$ , которые были бы ковариантны по отношению к любым произвольно определенным подстановкам;
2. Однако, опираясь на законы сохранения импульса и энергии [...], возможно выбрать систему отсчета таким образом, чтобы лишь линейные преобразования — в отличие от [специальной]<sup>19</sup> теории относительности — любые линейные преобразования оставляли уравнения ковариантными.

Все эти выводы выглядят в глазах Эйнштейна «вполне удовлетворительными». И в самом деле: «Оказывается, что понятию ускорения материальной точки так же, как и понятию скорости, нельзя приписывать абсолютное значение. Ускорение можно определить лишь как относительное ускорение точки по отношению ко всем другим телам». «Изложенная теория устраняет гносеологический недостаток, присущий не только первоначальной теории относительности, но и механике Галилея, что особенно подчеркивалось Э. Махом».

В тот же день, 9 сентября 1913 г., Эйнштейн выступает в Цюрихе перед Обществом естествоиспытателей.<sup>20</sup> «Из общих соображений можно показать, что уравнения, полностью определяющие гравитационное поле, не могут быть ковариантными относительно произвольных преобразований».

Эта убежденность основывается на проблеме «чёртика в дыре», которую он впервые официально излагает в виде «Комментария» в *Zeitschrift für Mathematik und Physik* в январе 1914 г. «... Я обнаружил, что уравнения, однозначно определяющие  $g_{ij}$  и в то же время общековариантные, вообще не могут существовать; доказательство этого следует ниже...».

## Стычка Ми с Эйнштейном

Эйнштейн и Ми встретились в Вене 23 сентября 1913 г. на ежегодном собрании Общества немецких естествоиспытателей и врачей. На миг встретились и сплелись, хотя и не очень гармонично, два подхода к нарождавшейся теории.

В параграфе 9 своего выступления, озаглавленного «Об относительности инерции»,<sup>21</sup> Эйнштейн впервые обрисовывает контуры того, что через пять лет он назовет принципом Маха.

Влияние идей Маха на мировоззрение Эйнштейна настолько фундаментально, что оправданно подробнее рассмотреть, как он их излагает здесь.

Ссылаясь на измерения, выполненные в 1888 году венгерским бароном Лорандом фон Этвешем, которыми он хотел показать полное равенство инертной и гравитационной масс,<sup>22</sup> Эйнштейн поясняет, что факт равенства инертной и гравитационной масс, установленный с очень высокой точностью, показался ему одним из наиболее ценных указаний, с помощью которого следовало создавать теорию. Необходимость найти более глубокое объяснение этому равенству и точке зрения Маха на относительность инерции — вот те две причины, которые побудили его посвятить отныне все свое время проблеме тяготения.

Согласно его вычислениям, говорит Эйнштейн, энергия покоящейся материальной точки уменьшается при помещении рядом с ней других масс, а ее инерция в то же время возрастает. Этот удивительный результат, замечает он, «представляет большой теоретический интерес». В самом деле, «если инерция тела повышается при скоплении масс в его окрестности, то едва ли можно отказаться от того, чтобы считать инерцию точки *обусловленной* существованием остальных масс. Следовательно, инерция проявляется как своего рода взаимодействие ускоряемой материальной точки со всеми остальными материальными точками [Вселенной]».

Отметив, что «эту точку зрения со всей остротой и ясностью выдвинул Э. Мах в своей истории механики», он предлагает называть это «гипотезой относительности инерции». С его точки зрения, любая новая теория тяготения, не удовлетворяющая этому принципу, никуда не годится.

Именно так, по его мнению, обстоит дело с другими конкурирующими теориями, представленными на этой конференции. Он говорит о самых разных теориях... кроме теории Ми. Ми рассержен: «Правда, что моя теория имеет своей целью описать материю в самом общем виде. Видимо, по этой причине она и не попала в поле зрения выступающего». «Нет, нет» — протестует Эйнштейн. «В таком случае, — продолжает Ми, — он с ней, видимо, не познакомился, иначе, вне всякого сомнения, он бы не забыл ее упомянуть».<sup>23</sup>

Эйнштейн заявляет, что читал его работу, «хотя, возможно, чересчур бегло», но не упомянул ее потому, что в ней не выполняется строго принцип

эквивалентности инертной и гравитационной масс, что, по его мнению, есть фундаментальное требование.

Ми тут же откликается: «Я рассчитываю вскоре опубликовать работу, демонстрирующую, что в теории Эйнштейна этот принцип также строго не выполняется». Он не забывает и слова Эйнштейна об идеях Маха. «Если я не ошибаюсь, г-н Эйнштейн собирается также включить в рассмотрение идею Маха, согласно которой невозможно абсолютным образом установить ускоренное движение. . . ».

Он объясняет, в чем заключается трудность. «Представим себе пассажира, сидящего в купе с задернутыми занавесками. Вдруг его начинает бросать из стороны в сторону, что он относит на счет беспорядочных толчков поезда, едущего по рельсам. Согласно предлагаемому Эйнштейном подходу, из принципа общей относительности следовало бы, что можно в точности воспроизвести ощущаемые пассажиром толчки, как результат воздействия масс, беспорядочно действующих рядом с поездом. . . притом, что те же массы весьма разумно “пребывали в покое” на вокзале. . . ! Вероятно, такую фантастическую ситуацию можно было бы описать математически — разве не придумывают “фиктивные” планеты для расчетов приливных эффектов, поскольку эффекты инерции рассчитать трудно — но никому из физиков никогда не придет в голову считать эти “фиктивные планеты” чем-то реальным. Точно так же, невозможно представить себе, чтобы эффекты инерции, ощущаемые нашим путешественником, интерпретировались как влияние реально существующих внешних масс — это противоречило бы нашему пониманию физики».

Эйнштейн не находит ответа на это уместное замечание. Он реагирует лишь через несколько дней и письменно: «Моя теория не удовлетворяет принципу общей относительности в полной мере. Но тем не менее, как я указывал, законы сохранения энергии и импульса ведут к специализации с далеко идущими последствиями» и т.д.

Эйнштейн все еще во власти заблуждения, которое пока не пускает его в землю обетованную. . .

Макс Борн прервал эту перепалку вопросом к Эйнштейну: «Согласно Вашей теории, с какой скоростью распространяется гравитация? Совсем не очевидно, что со скоростью света. . . » Эйнштейн ответил: «Это весьма запутанная математическая проблема. . . В общем случае, получить точное решение уравнений трудно. . . ».

Чувствуется его упорная целеустремленность идти вперед своим путем, на основе заложенных им фундаментальных принципов, с ощущением того, что он на правильном пути, в то время как конкуренты — Ми и Абрагам — заблуждаются, отдаляясь от верных принципов.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Письмо Эйнштейна Лоренцу, 2 февраля 1915 г., цитируется в John Norton, *Einstein Studies*, op. cit., vol. I, p. 151.

<sup>2</sup>Первая приводится в «Комментарии», опубликованном 30 января 1914 г. в *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, vol. LXII, 1914, p. 260; вторая и третья также в январе 1914 г., а четвертую он изложил в выступлении в Прусской академии наук в октябре 1914 г.

<sup>3</sup>Einstein A., *Die Formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, The Collected Papers, op. cit., vol. VI, doc. 9, para. 12. (*Формальные основы общей теории относительности*, А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, том I, с. 326).

<sup>4</sup>Курсив Эйнштейна.

<sup>5</sup>Можно описать эту трудность и по-другому: система координат есть лишь условная договоренность, позволяющая описывать положение объектов в пространстве; это все равно, что данное чему-то наименование. Изменение наименования никак не изменяет сам объект. «Изменение системы координат» не влечет за собой изменение точек пространства. Смешав конечный результат преобразований пространства и преобразований системы координат, Эйнштейн поставил перед собой кривое зеркало, в котором и увидел чёртика в дыре.

<sup>6</sup>Planck M., «Предложение выбрать Альберта Эйнштейна членом Прусской Академии наук», 12 июня 1913 г., *The Collected Papers*, op. cit., vol. V, doc. 445. Легко заметить, что изложение теории относительности весьма архаично: речь идет только об относительности времени, о пространстве не говорится ничего. Именно это и ставил Минковский в упрек Эйнштейну: «Однако, ни Эйнштейн, ни Лоренц»...

<sup>7</sup>Верный себе Бессо занимался сразу многим: в частности, он составил план философского трактата (видимо, так и не законченного). См., например, P. Speziali, *Correspondance*, op. cit., p. xxvi.

<sup>8</sup>*The Collected Papers*, op. cit., vol. IV, doc. 14).

<sup>9</sup>Эренфест П., личный дневник, цитируется в Brian D., *Einstein*, op. cit., p. 115.

<sup>10</sup>Письмо Эйнштейна Маху, 25 июня 1913 г., *The Collected Papers*, op. cit., Boston, vol. V, doc. 448.

<sup>11</sup>В Германии, как и во Франции, только директор мог иметь оплачиваемых ассистентов, что и объясняет, почему большие и малые институты плодились — и до сих пор плодятся — как грибы. . .

<sup>12</sup>Brian D., *Einstein*, op. cit., p. 116.

<sup>13</sup>Министерство образования направит проект указа Вильгельму Второму 6 ноября и тот подпишет его 12 ноября.

<sup>14</sup>Письмо Эйнштейна Лоренцу, 14 августа 1913 г., *The Collected Papers*, op. cit., vol. V, doc. 467. Именно это особенно заботило Эйнштейна в тот период: установить справедливость его «гипотезы относительности инерции» — будущего «принципа Маха» (см. приложение).

<sup>15</sup>Письмо Эйнштейна Паулю Эренфесту, 13 ноября 1913 г., *The Collected Papers*, op. cit., vol. V, doc. 481.

<sup>16</sup>Курсив Эйнштейна.

<sup>17</sup>Einsten A., *The Collected Papers*, op. cit., vol. IV, doc. 15.

<sup>18</sup>Спустя год расчеты дадут результат вдвое больший.

<sup>19</sup>В то время Эйнштейн говорил еще об «обычной» теории относительности. Термин «специальная теория относительности» он ввел в марте 1916 г. Эту теорию также иногда называют «частной теорией относительности».

<sup>20</sup>Einsten A., *The Collected Papers*, op. cit., vol. IV, doc. 16. («Физические основы теории тяготения», А. Эйнштейн, *Собрание научных трудов*, том I, с. 267).

<sup>21</sup>Einstein A., *Physikalische Zeitschrift*, vol. XIV, 1913, p. 1249 («К современному состоянию проблемы тяготения», А. Эйнштейн, *Собрание научных трудов*, том I, с. 273).

<sup>22</sup>Eötvös L. von, «Über die Anziehung der Erde auf verschiedene Substanzen», *Mathematische und naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn*, vol. VIII, 1890, p. 65.

<sup>23</sup>Эта дискуссия последовала за выступлением Эйнштейна, *Physikalische Zeitschrift*, vol. XIV, 1913, p. 1262.

## Снова математики

### В Геттинген приезжает Эмми Нётер

Вскоре разражается война. Весной 1915 г. в Геттинген приезжает молодая женщина. Это дочь математика Макса Нётера и сестра Фрица Нётера, также математика, в то время фронтовика.\* Она появилась на свет на родине Феликса Клейна в Эрлангене и защитила докторскую диссертацию по математике под руководством «короля теории инвариантов» Пауля Гордана, который любил собирать студентов за кружкой пива в эрлангенских кафе.

К несчастью для Амалии «Эмми» Нётер, в то время женщина не могла быть членом факультета немецкого университета, так как тогда она могла бы стать членом ученого совета. «А как бы к этому отнеслись наши воины?» — вопрошали патриоты. На что Давид Гильберт ответил: «Не понимаю, причем здесь пол, ведь это не баня. . .»,<sup>1</sup> и взял ее под свою опеку, хотя, увы, и не смог найти ей оплачиваемое место. Она ему очень нужна, поскольку никто лучше нее не владел математическими методами, необходимыми для разработки задуманной им «аксиоматической теории» физики.

Нётер принимается за работу, о которой известно со слов Гильберта: «Я рассчитываю на помощь Эмми Нётер при выяснении вопросов, связанных с моим законом энергии». И со слов Клейна: «Г-жа Нётер продолжает помогать мне в работе».<sup>2</sup> Но Нётер (бесплатно) работает не только с Гильбертом и Клейном. Она входит в группу, «занимающуюся очень трудными расчетами для Эйнштейна, но ни один из нас не понимает, зачем они», как рассказывала сама Нётер позднее.<sup>3</sup>

В июле Эйнштейну неожиданно везет — он получает приглашение прочитать в Геттингене серию лекций по теории относительности. Приглашение подписано Давидом Гильбертом.

Уютный городишко с крытыми красной черепицей домами наполовину пуст. Давид Гильберт все тот же, а Феликс Клейн сильно сдал, и оба они читают лекцию перед полупустыми аудиториями — их лучшие студенты на фронте. Даже те, кто не может воевать, стараются вносить свой вклад — плохо видящий Альфред Ланде работает в Красном Кресте. Жужжавшая как улей «Читалка» превратилась в библиотеку без читателей.

Оставшиеся математики принимают гостя с должным почтением. В ходе шести лекций, каждая по часу, он несет им «благую весть»: общековариантная формулировка теории относительности невозможна.

Феликс Клейн слушает его, покачивая головой (по крайней мере, мысленно). Позднее он скажет: «Теория относительности окутана облаком тайны. В этом частично вина и г-на Эйнштейна. Его мышление базируется на философских рассуждениях самого общего толка, а дальше им движет очень сильная физическая интуиция, а не четкие математические рассуждения. . . Благодаря контактам с Гроссманом и другими цюрихскими коллегами, он, конечно, познакомился с работами Гаусса и Римана, но он совсем не знает работа Лагранжа и переоценивает (среди прочих) Кристоффеля».<sup>4</sup>

Гильберт слушает скептически и погружен в раздумья.

\* Одаренный математик Фриц Нётер, на два года младше Эмми, после прихода к власти Гитлера уехал в СССР, где был расстрелян в сентябре 1941 года за «антисоветские настроения» — (прим. перев.).



## У Эйнштейна появляется ассистент

Сменивший Эйнштейна в Праге Филип Франк подробно рассказал, как проходило завершение общей теории относительности в последние дни осени 1915 г. «До той поры, — рассказывает он, — Эйнштейн разрешал встававшие перед ним задачи самыми простыми математическими средствами и с подозрением относился к “возвышенной математике”, поскольку полагал, что она служит не прояснению вещей, а запутыванию читателя». Но выполнение поставленной великой цели требовало изощренной математики, «и, столкнувшись с математическими трудностями, Эйнштейн понял, что ему нужен хороший ассистент-математик».<sup>5</sup>

Эйнштейн приезжает в Геттинген не один, а в сопровождении ассистента. Это необычный человек. Уроженец Брест-Литовска, принадлежавшего тогда Польше, Якоб Громмер был снедаем двумя страстями — талмудом и математикой. Он страдал слоновой болезнью и выглядел настолько отталкивающе, что «никто не хотел брать его ассистентом, не то что преподавателем». Эйнштейн берет его себе в ассистенты в Берлин.<sup>6</sup>

Его беспокоят и другие вещи. В октябре Берлинское общество Гёте, основанное для охраны немецкой культуры в традициях Гёте, проводит опрос общественного мнения о войне. Эйнштейн пишет статью и посылает ее в общество 23 октября. Он переделывает ее 11 ноября и еще раз 16 ноября.<sup>7</sup> Я привожу эти даты потому, что именно между 4 и 25 ноября того года была завершена разработка общей теории относительности.

## Гильберт выходит на охоту

В то время как Абрагам, Эйнштейн, Ми и другие изо всех сил, хотя пока и безуспешно, работают над общей теорией относительности, Давид Гильберт проводит время на Балтийском море на немецком островке Рюген, совсем недалеко от местечка Грайфсвальд, где профессорствует Ми. Это очаровательно место, продуваемое всеми ветрами холодной Балтики.

Это как раз то, что нужно любителю дикой природы Гильберту для того, чтобы нанести последние штрихи на свою аксиоматическую теорию физики, включающую одновременно и «проблему Ми» (электромагнетизм) и «проблему Эйнштейна» (гравитацию). За несколько дней все сделано, как уже случилось с Пуанкаре в Атлантике, где он пришел к концепции пространства-времени.

По возвращении в Геттинген, 14 ноября 1915 г., Гильберт посылает Эйнштейну открытку: «Я нашел аксиоматическое решение Вашей великой проблемы!», и приглашает того приехать в Геттинген чтобы присутствовать при представлении новой теории Императорскому научному обществу Геттингена во вторник, 16 ноября. Эйнштейн тут же отвечает, что приехать не сможет из-за общей усталости и болей в желудке, и просит Гильберта прислать ему копию своей работы, что Гильберт и делает.

Во вторник 16 ноября, Гильберт излагает свою теорию, озаглавленную «Основания физики»,<sup>8</sup> перед замороженной аудиторией, собравшейся в большом зале Императорского научного общества Геттингена. Новая теория основывается на двух аксиомах, из которых методом дедукции выводится все остальное. Вот эти аксиомы Гильберта:

**«Аксиома 1 (мировая функция Ми):** закон, управляющий физическими явлениями, зависит от универсальной мировой функции, вариация которой становится равной нулю при всяком изменении каждого из 14 гравитационных и электромагнитных потенциалов;

**Аксиома 2 (общековариантность):** мировая функция инвариантна относительно любых произвольных преобразований параметров Вселенной».

Попробуем их расшифровать. Первая аксиома утверждает, что можно построить лагранжиан, описывающий одновременно электромагнитное и гравитационное поля, создаваемые присутствием зарядов, масс и энергии во Вселенной. Вторая гласит, что эта «мировая функция» удовлетворяет критерию общей ковариантности.

Общей ковариантности! А ведь это была мечта Эйнштейна, которую он считал недостижимой!

«Основания физики» — это один из шедевров физики. Лишь Максвелл и Герц смогли ранее совершить такой же подвиг — объединить электричество и магнетизм, а Гильберт свел в единую теорию электромагнетизм и тяготение; отныне все известные в то время силы объединены.<sup>9</sup> Тщательно переписанная начисто женой Гильберта Кэт, эта работа Гильберта была тут же опубликована в трудах Геттингенского научного общества.<sup>10</sup> В этой работе содержатся также уравнения, известные теперь под именем «уравнений общей теории относительности Эйнштейна».

## Аксиоматическая теория

Мы не станем пытаться детально излагать здесь «Основания физики». Достаточно сказать, что аксиоматическая теория полностью выполняет обещанное. Исходя из двух простых и мощных аксиом, она показывает, как методом логической дедукции перейти от аксиом к основным теоремам, из которых наиболее замечательной является вывод тензорного уравнения общей теории относительности.

Метод, которым Гильберт получает это уравнение, сам по себе представляет маленький шедевр. Он задает для пространства-времени<sup>11</sup> некий параметр  $g$  и кривизну  $R$ , постоянную  $k$  и лагранжиан  $L$ . Этот лагранжиан имеет 20 компонент — 16 для описания гравитационного поля и 4 для электромагнитного, но лишь 10 из них независимы! Гильберт показывает, что выражение  $(L - R/2k)\sqrt{g}$ , которое он называет «мировой функцией Ми», остается неизменным при его вычислении по всему пространству и при *любом*<sup>12</sup> бесконечно малом линейном изменении компонент, а это есть свойство общековариантности!

В полном соответствии с двумя исходными аксиомами, такой подход немедленно, как прямое логическое следствие, приводит к тензорному уравнению, которое, по мнению Эйнштейна, существовать не может!

Как следствие теоремы, которая станет знаменитой после работы Нётер 1918 года, аксиоматическая теория приводит к еще одному, на этот раз неожиданному результату: оказывается, между компонентами поля существуют четыре соотношения, из которых, согласно Гильберту, следует, что «четыре уравнения электромагнитного поля можно рассматривать как с необходимостью следующие из десяти уравнений гравитационного поля».<sup>13</sup>

Этот результат изумляет его (что вполне понятно): «В этом смысле, можно сказать, что электромагнитные явления есть следствие гравитаци-

онных эффектов». Вспоминая о полувековой давности попытках Римана объединить электромагнетизм и тяготение, Гильберт замечает: «Я вижу в этом поразительное решение проблемы, поставленной Риманом, который впервые попытался найти связь между тяготением и светом».<sup>14</sup>

Аксиоматическая теория есть великолепная хрустальная пирамида, истинный монумент творческим способностям человека. Не должна ли она снискать всеобщее восхищение и вдохнуть в исследователей энтузиазм? А может быть ее создатель заслуживает Нобелевской премии по физике, в которой было отказано Пуанкаре?

Ничего подобного! Потому как в это время в Берлине...

### Физическое мышление заявляет свои права

Вернемся чуть назад, в Берлин, где Эйнштейн получил рукопись работы Гильберта и внимательно ее изучает.

Весьма встревоженный, Эйнштейн встает с одра болезни<sup>15</sup> и пишет Гильберту 18 ноября... упрекая того в неоригинальности подхода. «Вы обнаружили в точности то же, что я установил несколько недель назад»!

А дальше следует чисто эйнштейновская критика: «Трудность была не в том, чтобы найти общековариантные уравнения... [Читатель может заметить, что он неявно признает их вывод Гильбертом!] Трудно было распознать, что эти уравнения позволяют просто и естественно обобщить уравнения Ньютона».

Такая озабоченность прекрасно соответствует его философским взглядам. Ярый поклонник Ньютона, Эйнштейн не может вообразить, что станет создателем новой теории тяготения, радикально отличающейся от теории своего великого предшественника.

Эйнштейн приступает к двум расчетам, которые, если они будут согласовываться с данными опыта, придадут блеска его теории, хотя пока есть только ее фрагменты, которые он отчаянно пытается собрать воедино. Как скажет позже его биограф Абрахам Пайс: «Эти расчеты изменили всю его жизнь».<sup>16</sup>

Первый расчет касается отклонения лучей света при прохождении около Солнца. Отклонение возникает потому, что свет, как любое «тело», «обладает инерцией», как отметил Анри Пуанкаре в 1900 г. Два года ранее вычисления Эйнштейна дали величину в 0,83 дуговых секунды. Эйнштейн возвращается к ним, и на этот раз получает величину, вдвое большую (чуть ниже мы увидим почему).

Затем он обращается ко второму «потенциальному доказательству» своей теории — расчету смещения перигелия Меркурия.

Он достает из ящика расчеты, которыми он занимался пару лет назад с Мишелем Бессо. Расчеты занимают девять страниц и основываются на целой серии вытекающих друг из друга предположений. Повторяя шаг за шагом этапы расчетов, проделанных с Бессо, он строит метрику гравитационного поля Солнца (как точечной массы), определяет четырехмерную траекторию, по которой перемещалась бы в этом поле «пробная частица», т.е. Меркурий, преобразовывает эту траекторию в обычное пространство и, наконец, рассчитывает скорость, с которой смещается перигелий Меркурия.

В самом низу предпоследней страницы появляется формула, которую Эйнштейн сначала записывает как  $3\pi\alpha/a(1 - e^2)$ , прежде чем привести ее

к виду  $24\pi^3\alpha^2/T^2c^2(1-e^2)$ , не объяснив ни как, ни зачем... Это формула Гербера!

Как говорят его биографы, «он вне себя от радости», настолько он счастлив, что полученная им формула совпадает с «экспериментальными значениями».<sup>17</sup>

На самом деле эти расчеты вызывают проблемы.

Как мы видели, вековое смещение перигелия Меркурия составляет 9 минут и 32 дуговых секунды. Прибегнув к теории Ньютона, астрономы смогли объяснить большую часть этого смещения — 529 секунд. Оставшиеся 43 секунды объяснить не удавалось; это и была знаменитая «аномалия».

Эйнштейн рассчитал вековое смещение, полагая, что «пробная частица» Меркурий — единственное тело в поле тяготения Солнца, которое тоже представлено как материальная точка в пространстве. Такая модель приводит к вековому смещению перигелия в 43 секунды. Для вычисления *действительного* смещения, т.е. «наблюдаемой» величины в 9 минут и 32 секунды, нужно добавить к результату вычислений 529 секунд, которые были получены *при помощи теории Ньютона*. Итак, Эйнштейн, чтобы получить желаемый результат, по сути, использовал две различные теории.

Знал ли Эйнштейн в 1915 г. о формуле Гербера?

В 1920 г. берлинский физик Эрнст Герке раскопал малоизвестную до того статью, в которой Пауль Гербер привел свою знаменитую формулу, и перепечатал ее в журнале *Annalen der Physik* с комментарием, где предположил, что именно ей вдохновлялся Эйнштейн, выводя свою в точности такую же формулу.

Спустя год Эйнштейн категорически отверг такое предположение, написав в газете *Berliner Tageblatt und Handels-Zeitung*: «Я утверждаю, что общая теория относительности дала верное объяснение смещения перигелия Меркурия». И далее он уточняет: «Я не ссылался на работы Гербера, потому что не знал о них во время выполнения своих вычислений. [...] И даже если бы я о них знал, у меня не было никаких причин на них ссылаться».

## Эйнштейн представляет свои вычисления в Прусскую Академию наук

18 ноября 1915 г. Эйнштейн пишет Гильберту: «Сегодня я представил в Прусскую Академию наук сообщение, в котором количественно и без привлечения дополнительных гипотез получил величину смещения перигелия Меркурия, обнаруженного Леверье». И восклицает: «До сих пор этого не удавалось сделать ни в одной теории тяготения».

Гильберт тут же шлет Эйнштейну свои поздравления: «Если бы я умел считать так же быстро, как Вы, то электрон капитулировал бы перед моими уравнениями, а атом водорода должен был бы принести извинения за то, что он не излучает...».<sup>18</sup>

В текст своего сообщения Эйнштейн вставил, как бы между прочим и без объяснений, замечание о том, что он снова рассчитал величину отклонения света при прохождении около Солнца и теперь получил величину 1,74 дуговой секунды, что вдвое больше ранее полученной величины.

Конечно, все еще требовалось сформулировать теорию, на которой основывались все эти расчеты, и привести ее в окончательный вид, подобно

тому, как это сделал в Геттингене Гильберт. Эйнштейн принимается за дело. Он перечитывает работу Гильберта. Итак, общековариантная теория возможна. Считая ее невозможной по причинам фундаментального характера, он наложил на свои уравнения определенные ограничения, которые теперь ему больше не нужны. И Эйнштейн от них отказывается.

До сих пор он полагал, что тензор Риччи  $R_{ij}$  есть сумма двух тензоров  $A_{ij}$  и  $B_{ij}$ , каждый из которых ковариантен относительно только ограниченного ансамбля преобразований (ограниченная ковариантность) из-за чего он решил для описания гравитационного поля вместо  $R_{ij}$  (отвергнутого по описанным ранее причинам) использовать  $A_{ij}$ . Поэтому он записывал тензорное уравнение в виде  $A_{ij} = -kT_{ij}$ , где тензор  $T_{ij}$  соответствовал распределению вещества и энергии. Позже он поменял точку зрения и заменил в своем уравнении  $A_{ij}$  на  $G_{ij}$ , что привело к следующим результатам.

У каждого тензора есть некая характеристика, которая носит название *следа*. Я не буду здесь давать его определение, и скажу только, что уравнение  $G_{ij} = -kT_{ij}$ , как и предыдущее, допускает лишь ограниченный набор преобразований, а именно таких, для которых, в обозначениях Эйнштейна,  $\sqrt{-g} = 1$ . Однако, из этого условия для следа тензора  $T_{ij}$  следует, что  $T = 0$ .

Чтобы обосновать это удачно подвернувшееся условие, Эйнштейн прибегает к физической интуиции. Заметив, что след тензора, представляющего электромагнитную энергию, всегда тождественно равен нулю, он принял, что все имеющееся во Вселенной вещество имеет чисто электромагнитное происхождение, и что, как следствие, условие  $T = 0$  выполняется в природе.

18 ноября он все еще придерживается такой точки зрения. Но тензорное уравнение Гильберта имеет вид  $G_{ij} = -k(T_{ij} - g_{ij}T/2)$ , где  $T$  есть след тензора  $T_{ij}$ . У Гильберта этот след не равен нулю! В этом, кстати, и состоит великое достижение общей теории относительности — наличие в окончательном уравнении  $T$  меняет все дело. Без  $T$  уравнение в лучшем случае частично ковариантно, с  $T$  оно ковариантно *полностью*.

Как и по какой причине Эйнштейн в конце концов отказался от условия  $T = 0$ ? Трудно сказать.<sup>19</sup> 18 ноября это условие все еще было неотъемлемой частью его теории.

В четверг 25 ноября, Эйнштейн представляет свои «уравнения гравитационного поля» в Прусской Академии наук. В конце выступления он заявляет: «Тем самым, наконец, завершено построение общей теории относительности как логической схемы».<sup>20</sup>

В Геттингене Гильберт только что, по сути, сказал следующее: «Основания физики» есть аксиоматическая теория. Если она позволяет лучше понять природу, то это прекрасно, но она есть лишь создание разума. Она не есть теория чего бы то ни было.

Эйнштейн же, по сути, сказал следующее: общая теория относительности (которая, кстати, описывает только тяготение) есть объяснение физическое, то есть «реальное» описание устройства Вселенной. Разве не позволила она предсказать или объяснить реально существующие явления, в частности, отклонение лучей света при их прохождении около Солнца и смещение перигелия Меркурия? (Не будем, однако, забывать, что аксиоматическая теория Гильберта также предсказывает эти эффекты, поскольку его тензорное уравнение позволяет их рассчитать...!) Так начинается процесс обращения ситуации в пользу «физического мышления».

Эйнштейн пишет Мишелю Бессо: «Сегодня я послал тебе свою работу. Самые несбыточные надежды стали реальностью. Общая ковариантность. Смещение перигелия Меркурия — великолепная точность. Последнее прекрасно согласуется с астрономическими данными. В этот раз, истина находилась в том, что лежало рядом...».<sup>21</sup>

Пауль Эренфест воспринимает новости с меньшим энтузиазмом. Он пишет в Харлем, ушедшему на покой Лоренцу, которого он сменил на профессорском посту в Лейдене, и спрашивает, согласен ли тот с тем, что в своей «теории от 25 ноября» Эйнштейн «отказался от аргументации невозможности представления уравнений гравитационного поля в ковариантной форме», что представляется Эренфесту «предательством» прежних убеждений.<sup>22</sup> Лоренц ответил, что он уже «поздравил Эйнштейна с полученным им блестящим результатом».<sup>23</sup> Эренфест отвечает в тот же день, упрекнув Лоренца в том, что его поздравления «напоминают секретный знак, которыми масоны приветствуют друг друга».<sup>24</sup>

Узнав об этом, Эйнштейн пишет Лоренцу: «Серия моих статей о тяготении — это цепь неверных шагов, которые, тем не менее, постепенно привели к поставленной цели. Основные уравнения в конечном итоге оказались верными, но вывод их ужасен. Этот недостаток необходимо устранить».<sup>25</sup>

Эйнштейн интересуется, не займется ли этим Лоренц, поскольку «... я мог бы и сам сделать это, так как теперь мне все ясно, но, к сожалению, природа обделила меня даром четко излагать свои мысли». Лоренц дает понять Эренфесту, что было бы «гораздо лучше», если бы Эйнштейн сам объяснил свою теорию как можно проще, «с тем чтобы каждый физик мог познакомиться с ней».<sup>26</sup> Эйнштейн тут же принимается за дело.<sup>27</sup>

Спустя шесть месяцев он поверяет верному Эренфесту свои мысли о Гильберте: «Мне не нравится изложение Гильберта... Излишне детализированное... излишне усложненное... недобросовестное по структуре — изложение “сверхчеловека”, который прячет свой метод».<sup>28</sup> Но...

Но вскоре он проникнется идеями великих математиков и займется поиском всеобщей теории, объединяющей все законы природы... и будет биться над этим до конца жизни.

Что же касается математика Гильберта, то его имя не упоминается в классических биографиях Эйнштейна, кроме книги А. Пайса. Его не упоминают ни Филип Франк, ни Жак Мерло-Понти. Никогда не слышал о нем и Денис Брауэн. Он удовлетворяется цитатой из Банеша Хоффмана, ассистента Эйнштейна в США, который говорит:

«Поразительно, что эти принципы привели Эйнштейна к его замечательным уравнениям, одновременно столь сложным, и столь простым». И далее он приводит комплимент, который весьма порадовал бы Гильберта, если бы был адресован ему: «Мощь и естественное совершенство как их формы, так и содержания, делают их неопределимо прекрасными».<sup>29</sup>

Эйнштейн и сам сказал: «Если бы вы только знали, с какими трудностями я столкнулся в математике».<sup>30</sup>

Отметим также слова единственного непосредственного свидетеля этого великого свершения — Макса Борна. Он был рядом с Эйнштейном в Берлине и позднее сказал: «В 1915 году в Берлине у меня было множество обсуждений с Эйнштейном, пока он делал свои вычисления, в результате чего я решил, что никогда не займусь такого рода исследованиями. Основы общей теории относительности показались мне тогда, и кажутся и те-

перь, величайшим достижением человеческой мысли в процессе познания природы, поразительным сплетением философского подхода, физической интуиции и таланта математика в том, что касается установления связи с экспериментальными данными. Одним словом, это великолепное произведение искусства, которое требует, чтобы над ним раздумывали и им восхищались... издавека».<sup>31</sup>

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Reid C., *Hilbert*, op.cit., p. 143.

<sup>2</sup>Klein F., *Göttinger Nachrichten*, 1917, p. 469.

<sup>3</sup>Цитируется по Pais A., *Subtle is the Lord...*, p. 276. (Пайс А., *Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна*, с. 266). После ее безвременной кончины в США в 1935 г. Эйнштейн сказал, что «она входила в число самых значительных и самых творческих гениев математики».

<sup>4</sup>Klein F., *Niedersächsische Staats-und-Landesbibliothek Göttingen*, Cod. ms. 21L, p. 63.

<sup>5</sup>Frank P., *Einstein*, op. cit. p. 305.

<sup>6</sup>Математик-виртуоз Якоб Громмер сам осваивал математику в Геттингене (хотя тогда почти не знал немецкого) под благосклонным присмотром Гильберта, который добился для него разрешения защитить докторскую диссертацию, хотя у него не было даже школьного аттестата. Верный помощник Эйнштейна, он долгое время оставался в его тени. Эйнштейн так отзывался о нем в 1925 г.: «Якоб Громмер был моим верным помощником в последние годы разработки общей теории относительности, в которой он проделал все расчеты». Einstein A., *Sitzungsberichte, Preussische Akademie der Wissenschaften*, Wien, 1925, p. 419.

<sup>7</sup>Einstein A., «Meine Meinung über den Krieg» («Мое мнение о войне»), *Das Land Goethes 1914–1916. Ein vaterländisches Gedenkbuch*. Herausgegeben vom Berliner Goethebund, Deutsche Verlags-Anstalt, 1916, p. 30.

<sup>8</sup>По аналогии с его первой большой работой, озаглавленной «Основания геометрии».

<sup>9</sup>Напомним, что речь идет только о полях. Теории, включающей также и частицы, нет до сих пор.

<sup>10</sup>Hilbert D., *Gesellschaft der Wissenschaften in Göttingen*, 1915, p. 395.

<sup>11</sup>Параметр  $g$  есть *детерминант* метрики. Если бы у него было только четыре компоненты, он имел бы вид  $g = g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}$ . Аналогичный вид он имеет и для метрики с 16 компонентами, как в случае пространства-времени.

<sup>12</sup> $g_{ij} \rightarrow g_{ij} + \delta$ , где  $\delta = 0$  на границах области интегрирования. Использованный здесь Гильбертом «вариационный принцип» — один из излюбленных методов, который применяли математики к физическим задачам со времен Лагранжа. Некоторые, однако, считали, что его нужно всячески избегать.

<sup>13</sup>Гильберт использовал эту теорему без доказательства, которое было дано Эмми Нётер через два с половиной года (Noether E., *Göttinger Nachrichten*, 1918, p. 37, 235). Вполне вероятно, что Нётер сообщила Гильберту об этой теореме, когда он готовил свою работу.

<sup>14</sup>Гильберт имеет в виду работу Римана «Gravitation und Licht», *Gesammelte Mathematische Werke und Wissenschaftlicher Nachlass*, Leipzig, Teubner, 1876, p. 496.

<sup>15</sup>На протяжении нескольких дней у него были желудочные спазмы, которые приковали его к постели.

<sup>16</sup>Pais A., *Subtle is the Lord...*, op. cit. p. 253. (Пайс А., «Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна», с. 245).

<sup>17</sup>Кажущееся совпадение результатов расчетов Эйнштейна с «экспериментальными данными» вызывает проблемы принципиального характера. Более подробно это рассмотрено в Приложении.

<sup>18</sup>Письмо Гильберта Эйнштейну, 19 ноября 1915 г., приводится в Pais A., *Subtle is the Lord...*, op. cit., p. 260. (Пайс А., «Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна», с. 252).

<sup>19</sup>Некоторые физики пытались ответить на этот вопрос, но без особого успеха. См., в частности, Norton J., «How Einstein Found His Field Equations», *Einstein Studies*, op.cit.,

vol. I, p. 101–159. Эйнштейн в явном виде использовал условие  $T = 0$  в своем расчете смещения перигелия Меркурия, представленном в Прусскую Академию наук 18 ноября.

<sup>20</sup>Einstein A., *Sitzungsberichte*, Preussische Akademie der Wissenschaften, Wien, 25 ноября, p. 844. (Эйнштейн А., «Уравнения гравитационного поля», Собрание научных трудов, т. I, с. 448).

<sup>21</sup>Открытка, отправленная Эйнштейном Мишелю Бессо, 10 декабря 1915 г., *Correspondance*, op. cit., doc. 12.1. Прежде чем заняться этим делом, Эйнштейн попросил своего друга Эрвина Фрейндлиха, сотрудника Потсдамской обсерватории, заверить его в том, что смещение перигелия Меркурия есть неоспоримый факт.

<sup>22</sup>Письмо Эренфеста Лоренцу, написанное 23 декабря 1915 г., через месяц после статьи Эйнштейна 25 ноября.

<sup>23</sup>Письмо Лоренца Эренфесту, 10 января 1916 г.

<sup>24</sup>Письмо Эренфеста Лоренцу, 12 января 1916 г.

<sup>25</sup>Письмо Эйнштейна Лоренцу, 17 января 1916 г.

<sup>26</sup>Письмо Лоренца Эренфесту, 22 января 1916 г.

<sup>27</sup>В результате он опубликовал свою первую статью, адресованную «широкой публике», «О специальной и общей теории относительности, общедоступное изложение», (Эйнштейн А., Собрание научных трудов, т. I, с. 530). Эйнштейн любил в шутку говорить, что у него получилось «общеНЕдоступное изложение».

<sup>28</sup>Письмо Эйнштейна Паулю Эренфесту, 24 мая 1916 г., приводится в Pais A., *Subtle is the Lord...*, op. cit., p. 261. (Пайс А., «Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна», с. 254). В частности, он ставит в упрек Гильберту, что тот хотел одновременно рассматривать и гравитацию, и электромагнетизм. Слово «сверхчеловек» не имеет расистского подтекста, а отражает мнение Эйнштейна о том, что геттингенские математики считали себя выше физиков. Кстати, в письме Г. Вейлю от 23 ноября 1916 года Эйнштейн настаивает на том, что метод получения Гильбертом тензорного уравнения был «инфантильным». Дружеская переписка Эйнштейна с Гильбертом внезапно прерывается 20 ноября и возобновляется лишь 20 декабря, когда Эйнштейн пишет ему: «У нас произошла размолвка, причины которой я не хочу анализировать. Сейчас мне удалось полностью отделаться от горького чувства, которое она во мне вызвала. Просто стыдно подумать, что двое приличных людей, сумевших отчасти отрешиться от мелких страстей человечества, не могут наслаждаться общением друг с другом». (Цитируется в Pais A., *Subtle is the Lord...*, op. cit., p. 261. Пайс А., «Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна», с. 253).

<sup>29</sup>Brian D., *Einstein*, op. cit., p. 123.

<sup>30</sup>Цитируется в книге F. Balibar, *Einstein, la joie de la pensée*, op. cit., p. 57. Это замечательная небольшая книга, хотя и в ней имя Гильберта не упоминается ни разу!

<sup>31</sup>Born M., «Physics and Reality», *Helvetica Physica Acta*, vol. IV (supplément), op. cit., 1956, p. 244.



## Заложник славы

### Перемирие

Не успел отзвонить колокол, возвестивший перемирие 11 ноября 1918 г., как по Европе пронесся вихрь событий, предвещавших большие перемены. Британский военный министр Уинстон Черчилль (тот самый!) сильно озабочен угрозой Европе со стороны только что образовавшейся Советской России. В Риме Бенито Муссолини (тоже тот самый!) собирает под свои знамена итальянских солдат. А в Берлине студенты с красными повязками на рукавах захватывают ректора университета, который обращается за помощью к Эйнштейну. Макс Борну, чтобы добраться до Эйнштейна приходится пробиваться через улицы, забитые орущими во все горло молодыми людьми с красными кокардами. Считалось, говорил Борн, что Эйнштейн был левым, если не сказать «красным»...

Эйнштейн добивается освобождения пленника и возвращается домой «переполненный ощущением, что он участвовал в историческом событии и с надеждой, что пришел конец высокомерию и прусской аристократии, конец засилью чиновников и всесильной армии».<sup>1</sup>

В Кембридже, астроном Артур Стэнли Эддингтон пребывает в состоянии возбуждения. Этот квакер и убежденный пацифист уже на протяжении ряда лет следит за работами Эйнштейна, в чем ему помогает его коллега, голландский астроном Виллем де Ситтер. В то время как в Европе попахивает новой войной, ему приходит в голову идея сделать Эйнштейна фигурой мирового значения, чтобы содействовать делу мира и взаимопонимания народов. Он убеждает своего коллегу, сотрудника Гринвичской обсерватории Эндрю Кроммелина, принять участие в двойной экспедиции — в Бразилию и к берегам Африки для наблюдения солнечного затмения, которое, как сообщил Королевский астроном сэр Фрэнк Уотсон Дайсон, должно было произойти 29 мая 1919 г. Эддингтон объяснил, что это позволит проверить предсказание Эйнштейна и возвестить результат всему миру.\*

В указанный день Кроммелин готов к наблюдениям в Собрале, в Бразилии, а сэр Артур — на остров Принсипи, португальском владении в Гвинейском заливе, на западном побережье Африки.

Сэр Артур оставил «драматическое» описание наблюдений экспедиции: «Все было готово. Метроном начал отсчитывать 302 секунды полного затмения... Когда началась фаза полного затмения, темный диск Луны был слабо виден через наплывшее облако... Было сделано 16 фотографий с экспозицией от двух до 20 секунд. На первых снимках звезд не было видно, но к концу затмения облако немного рассеялось... Мы смогли получить один снимок, на котором были четко видны пять звезд Гиады и созвездие Быка, что и требовалось для измерений».<sup>2</sup>

По возвращении в Англию, астрономы приступили к обработке снимков. Полученные результаты были неоднозначны — отклонение лучей света бы-

\* Сам Эддингтон описывал эти события иначе. Он был убежден в справедливости теории относительности Эйнштейна и не видел необходимости в экспедиции по наблюдению солнечного затмения. Ему было вменено в обязанность организовать такую экспедицию в качестве условия освобождения от воинской повинности в Первую мировую войну. Сэр Артур отказался служить в армии по религиозным соображениям — квакерам запрещалось держать оружие. См. S.Chandrasekhar, «Eddington, The most distinguished astrophysicist of his time», Cambridge University Press, 1983. — (прим. перев.)

ло в пределах от 0,87 дуговых секунд до... величины вдвое большей. Молодой голландский астроном Бальтазар ван дер Пол привозит эти результаты в Лейден и сообщает их де Ситтеру, а тот, в свою очередь, Лоренцу. Лоренц 22 сентября отправляет Эйнштейну телеграмму: «Эддингтон обнаружил отклонение звезд Солнцем. Предварительные измерения дают между 0,9 и вдвое больше».<sup>3</sup>

Эйнштейн в восторге — эти цифры могут совпадать с результатами его расчетов! Он тут же посылает матери открытку: «Сегодня хорошие новости. Г.А. Лоренц телеграфировал, что английская экспедиция подтвердила искривление лучей света Солнцем. Подробности в следующем письме».<sup>4</sup>

Отклонение, рассчитанное Эйнштейном в 1915 г., составляло 1,74 дуговой секунды. Отклонение, измеренное в Собрале, было 1,98 с ошибкой плюс-минус 0,30; измерения Эддингтона дали величину 1,61 с ошибкой также около плюс-минус 0,30. При других обстоятельствах такое соответствие результатом расчетов было бы признано «удовлетворительным», но никак не «убедительным». Однако обстоятельства были исключительными. Член Прусской Академии наук, физиолог Карл Штумпф 22 октября направляет Эйнштейну поздравление: «Всей душой мы разделяем ту радость, которую Вы должны испытывать, и гордимся тем, что после военно-политического краха Германии ее наука смогла добиться такой победы».<sup>5</sup> Эйнштейн отвечает: «Я узнал, что Эддингтон получил также и количественное подтверждение»<sup>6</sup>...

Чтобы попытаться спасти мир в Европе, более хрупкий, чем когда-либо ранее, президент Королевского общества вместе с президентом Королевского астрономического общества встретились в Лондоне и решили объявить о появлении «нового пророка», возвестившего новую картину мира. Церемония должна была быть чрезвычайно торжественной, организованной так, как умеют только англичане, конечно, когда захотят.

## Канонизация Эйнштейна

6 ноября 1919 г. исполняющий обязанности президента Королевского общества сэр Джозеф Джон Томсон созывает торжественное совещание. Основные участники — сам сэр Джозеф, Королевский астроном Фрэнк Дайсон и руководители двух экспедиций, измерявших отклонение лучей света — Эддингтон и Кроммелин. Первым берет слово Королевский астроном: «После тщательного изучения фотопластинок я готов заявить, что расчеты Эйнштейна подтверждены. Получен совершенно определенный результат, в соответствии с которым свет отклоняется согласно закону тяготения Эйнштейна».

Кроммелин приводит дополнительные детали, а затем выступает Эддингтон: «Теория Эйнштейна позволяет объяснить явление смещения перигелия Меркурия, а также отклонение лучей света, составившее  $1,98'' \pm 0,30''$  в Собрале и  $1,61'' \pm 0,30''$  у западного побережья Африки».

Тут встает польский ученый Людвик Зильберштейн (1872–1948) и заявляет: «Пока нет достаточных оснований утверждать, что искривление лучей света, наличие которого я признаю, вызывается тяготением». И, указав на висящий в зале портрет Ньютона, провозглашает: «Память об этом великом человеке заставляет нас с огромной осторожностью относиться к попыткам изменить или полностью пересмотреть его закон тяготения».

Все взоры обращаются к сэру Джозефу, который выносит вердикт: «Это самый важный результат, полученный в теории тяготения со времен Ньютона, и весьма символично, что о нем объявлено на заседании общества, столь тесно связанного с именем великого ученого. [...] Этот результат — одно из высочайших достижений человеческого разума»...

На следующий день газета *London Times* публикует на первой странице политические новости: *Перемирие и условия мирного договора, Немцы вызваны в Париж, Разрушенная Франция, Ход реконструкции, Военные преступления против Сербии*. На шестой колонке той же страницы напечатано: «*Научная революция, Новая теория Вселенной, Идеи Ньютона устарели*».

В середине колонки с подзаголовком «Искривление пространства» следует лаконичное изложение: «В общем виде ситуацию можно описать так — законы Ньютона предполагают, что пространство неизменно, так что, например, сумма углов треугольника всегда равна  $180^\circ$ . Но эти законы основываются на наблюдении, согласно которым сумма углов треугольника равна  $180^\circ$ , а окружность всегда правильная. Однако, некоторые физические факты, похоже, ставят под вопрос всеобщность этих наблюдений и дают основания предполагать, что пространство может обладать некоторой деформацией или кривизной»... Заметка заканчивается осторожным предупреждением: «Эти предсказания были проверены в двух или в трех случаях, но вопрос, подтверждают ли измерения сделанные предсказания пока остается открытым».

Газета *Times* на следующий день подхватывает тему и объявляет о «научной революции», переводя ее в плоскость личностей: «Эйнштейн против Ньютона», и приглашает высказаться на ее страницах не только Эйнштейна, но и других физиков.

В интересах мира Эйнштейн решает включиться в игру.

В это же время в Геттингене приходит и час Эмми Нётер — она получает должность приват-доцента и, наконец, может зарабатывать гроши, давая отстающим студентам университета частные уроки математики.

О том, чтобы избрать ее членом научного общества Геттингена, не может быть и речи — до сих пор это не удавалось ни одной женщине. Гильберт на одном из собраний с горечью спросил: «Сколько выдающихся ученых приняли мы за последние годы в члены общества»? И оглядев коллег, сам же ответил: «Нуль. Ровно нуль!».<sup>7</sup>

## В поисках единой теории поля

Время течет своим чередом.

1924 г. Гильберт заканчивает последний большой труд по математической физике, озаглавленный, как и в 1915 г., «Основания физики».<sup>8</sup> Он обобщил основные полученные в 1915 г. результаты, сделал несколько уточнений, особо упомянув, в частности, важнейший вклад Эмми Нётер и великий синтез 1915 года.<sup>9</sup>

1925 г. В Геттингене Гильберт оставляет математическую физику, поручая ее Макс Борну. Назначенный директором физического института Борн окружает себя плеядой молодых ученых, оставивших свой след в истории — там работали Вернер Карл Гейзенберг (Нобелевская премия за 1932 г.), Поль Дирак (Нобелевская премия за 1933 г.), Вольфганг Паули

(Нобелевская премия за 1945 г.), Роберт Оппенгеймер – будущий научный руководитель Манхэттенского проекта в Лос-Аламосе в 1945 году. . . Самому старшему из них, Паули, в то время было 25 лет! Этим четверым и другим ученым было суждено в следующие 20 месяцев напряженнейшей работы стать основателями совершенно новой области — квантовой механики.<sup>10</sup>

Эйнштейн ревниво следит из Берлина за развитием событий, не принимая в них участия, поскольку, по его мнению, они обречены на провал — «Бог не играет в кости». Он принимается за другую, более многообещающую, на его взгляд, задачу — объединение гравитации и электромагнетизма в духе Гильберта, создававшего основания физики, теорию, структуру которой он продолжал считать «не очень честной».<sup>11</sup> Как и в случае местного времени, он хочет строить новую «теорию единого поля», призванную заменить теорию Гильберта, не на основе аксиоматики, а исходя из «обнаруженных» фактов.

В начале лета, преисполненный энтузиазма, он объявляет: «После двух лет напряженной работы я полагаю, что нашел истинное решение этой проблемы».<sup>12</sup> *Истинное решение. . .*

Но как и в 1915 г., когда он не без юмора говорил сам о себе: «Этот Эйнштейн вытворяет что хочет. Каждый год он отрекается от того, что написал годом раньше»,<sup>13</sup> он быстро разочаровывается. Он пишет Эренфесту 18 августа: «Моя новая теория красива, но неоднозначна».<sup>14</sup>

В следующем году он рассматривает пространство–время пяти измерений, и отказывается от него через два года,<sup>15</sup> а в 1928 г. вводит понятие «параллелизма на расстоянии» . . .

Для описания гравитационного и электромагнитного полей, Гильберт в «Основаниях физики» использовал десять независимых переменных. В своей новой теории Эйнштейн использует единое поле с . . . 24 независимыми компонентами! Это что, тоже физика? Ведь приходится применять все более и более «математические» методы, с тем чтобы во что бы то ни стало заставить пространство–время воспроизводить своими деформациями все явления природы.

4 ноября 1928 г. *New York Times* провозглашает: «Эйнштейн на пороге великого открытия; не переносит вмешательства». Новость распространяется и Эйнштейн напрасно пытается этому противиться. Один журналист сообщает: «Вся новая теория Эйнштейна помещается на шести страницах, они писались со скоростью одна страница в год! Шесть страниц — это очень много, если учесть, что предыдущая теория относительности [от 25 ноября 1915 г.] заняла лишь три страницы».

Лондонский универмаг Selfridges выставляет все шесть страниц в своей витрине.

В декабре 1932 г. Эйнштейн уезжает из Германии в США. В последний момент он говорит жене: «Обернись, Эльза, ты больше никогда не увидишь этот дом».

С борта теплохода «Сан-Франциско» он посылает открытку математику Эли Картану, одному из тех, кто пришел на смену Пуанкаре в Сорбонне: «Я окончательно отказался от параллелизма на расстоянии. Я убежден, что эта конструкция не имеет абсолютно ничего общего с истинными свойствами пространства. Вместе с моим ассистентом д-ром Майером, мы рассматриваем другую теорию, основанную на пятимерных векторах в четырехмерном пространстве. Я надеюсь, что эта теория близка к описанию структуры

физического пространства без использования статистической интерпретации. Я никак не могу согласиться с этим догматом нового поколения физиков»...

Этот «догмат» теперь называется квантовой механикой...

Эйнштейн с женой, Вальтером Майером и «кухаркой-секретарем-сиделкой» Элен Дюкас прибыли в Нью-Йорк дождливым днем 17 октября 1933 г. Мэр Нью-Йорка, прибывший с почестями встречать Эйнштейна и отвезти его в гостиницу, остался ни с чем — Эйнштейна уже умыкнул его друг Абрахам Флекснер, который увез его на другой берег Ист-Ривер в Нью-Джерси.

В Принстонском институте высших исследований Эйнштейну показывают его новый кабинет, и он тут же просит дать ему мусорную корзинку, чтобы, как он поясняет, «выбрасывать все свои глупости».

Через год геттингенские математики разлетаются по всему миру. Рихард Курант обосновывается в Ля Рошели, неподалеку от Нью-Йорка, Эмми Нётер находит прибежище в коллеже Брин Мор, рядом с Принстоном, ее брат Фриц оказывается в сибирском городе Томске, Макс Борн спасается в Шотландии.

## Одиночество

В 1935 г. после хирургической операции умирает Эмми Нётер.<sup>16</sup> В следующем году, 7 сентября, приходит черед Марселя Гроссмана, а 20 декабря умирает Эльза Эйнштейн.

Он остается один. Одиноким, отгороженный от всего мира в своем «карточном домике», он обречен продолжать работу в единственном оставшемся в его распоряжении направлении — создавать единую теорию поля. Правда, у него есть ассистенты, по крайней мере, один из них будет работать с ним до конца его дней.<sup>17</sup>

В Геттингене, 23 января 1942 г., Гильберт празднует свой 80-летний юбилей. Через несколько дней Берлинская академия присуждает ему «специальную премию». В тот же день он неудачно падает, и через год умирает от осложнений.

На похоронах присутствуют двенадцать человек. Произносивший траурную речь Арнольд Зоммерфельд громогласно вопрошает: «Что было его величайшим вкладом в науку? Инварианты? Его любимый предмет — теория чисел? Интегральные уравнения?»

Ему не приходит в голову вспомнить «Основания физики», а ведь это было одно из самых замечательных достижений Гильберта.

## Завещание Эйнштейна

Эрнст Габор Страус в 1947 г. оставляет пост ассистента Эйнштейна, чтобы занять должность профессора. На его замену тот приглашает молодого венгерского математика Джона Кемени. Через год Кемени завершает расчеты для Эйнштейна, и приходит пора их применять, но Кемени не уверен, что справится с этим. Он предлагает Эйнштейну пригласить специалиста, и тому удастся заполучить редкую птицу — молодую женщину-математика! Ее зовут Брурия Кауфман, ей 22 года, а диссертацию по математике она защитила в Колумбийском университете в 19 лет. Это новая Эмми Нётер!

И снова проходят годы...

В 1953 г. английский физик сэр Эдмунд Тейлор Уиттекер (1873–1956), член Лондонского Королевского общества и коллега Макса Борна по университету Эдинбурга, друга Эйнштейна, решил опубликовать второй том своего труда «История теорий эфира и электричества», первый том вышел в 1910 г. и имел определенный успех.<sup>18</sup> Макс Борн безуспешно пытается отговорить своего коллегу от помещения во втором томе критических замечаний в адрес Эйнштейна. Уиттекер стоит на своем. Второй том содержит компрометирующие утверждения, которые тут же вызвали пересуды в замкнутом мире физиков. Сэр Эдмунд заявил, что в 1905 г. Эйнштейн «стал продвигать теорию относительности Лоренца и Пуанкаре с некоторыми дополнениями, которые и привлекли к себе большое внимание», а это было табу среди физиков.

Узнав об этом, Эйнштейн вскипел. В октябре он написал Борну: «Я не думаю, что должен охранять, как свою собственность, несколько полученных мной результатов, уподобляясь старому скряге, защищающему накопленные им монеты». . . И добавляет в духе Спинозы: «Я не хочу этого делать. . . Я ведь совсем не обязан читать ту вещь».<sup>19</sup>

На самом деле, эта история его сильно задела. Спустя несколько дней поклонники Эйнштейна сообщили, что хотят организовать в Берне в 1955 г. празднование 50-летия создания теории относительности. Эйнштейн пишет, что к сожалению состояние здоровья не позволит ему принять участие. И коварно и мстительно добавляет: «Я надеюсь, будут должным образом отмечены заслуги Лоренца и Пуанкаре».<sup>20</sup>

12 апреля 1955 г. Брурия Кауфман, как обычно, приходит в кабинет Эйнштейна, комнату 115 в Фалд-Холле Принстонского института высших исследований. Лицо ее босса искажено гримасой боли. После приступа он говорит ей: «Все в порядке, но со мной не все в порядке». На следующий день дома он принимает израильского посла Абба Эбана. После обеда он встает с постели и тут же падает. В больнице с ним случается разрыв аневризмы аорты. Эйнштейн скончался в ночь на 18 апреля. Его друг, врач Натан, на следующий день развеивает его прах над рекой Делавэр.

Через три месяца в Берне на празднование 50-й годовщины создания теории относительности собрались 89 участников из 22 стран.<sup>21</sup> По желанию Эйнштейна, председательствовавший на конференции Вольфганг Паули попросил старого друга Эйнштейна Макса Борна воздать должное заслугам Лоренца и Пуанкаре.

Тот слабо справляется с задачей. Он невнятно произносит: «Подход, использованный Пуанкаре, был точно таким же, как и подход, предложенный Эйнштейном в первой статье 1905 г. . . » и задает вопрос: «Означает ли это, что Пуанкаре уже все знал до Эйнштейна? Возможно». . .<sup>22</sup>

Не «возможно», а точно. . .

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Born M., *My Life*, New York, Scribner's, 1978, p. 185.

<sup>2</sup>Eddington A., приводится в Frank P., *Einstein*, op. cit., p. 215.

<sup>3</sup>Телеграмма Лоренца Эйнштейну воспроизводится в виде факсимиле в Sugimoto K., *Einstein*, Paris, Belin, 1990, p. 56.

<sup>4</sup>Открытка Эйнштейна, адресованная его матери, *ibid.*, p. 57.

<sup>5</sup>Письмо Карла Штумпфа Эйнштейну, 22 октября 1919 г., цитируется в Pais A., *Subtle is the Lord...*, *op. cit.*, p. 306. (Пайс А., «Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна», с. 293).

<sup>6</sup>Письмо Эйнштейна Карлу Штумпфу, 3 ноября, *ibid.*, p. 306. (Пайс А., «Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна», с. 293).

<sup>7</sup>Reid C., *Hilbert*, *op. cit.*, p. 166. Эмми Нётер, по крайней мере, удалось избежать несчастной судьбы своей гениальной предшественницы, математика Гипатии (370–415), дочери Теона Александрийского, жившей 15 столетий назад. Блестящий комментатор Арифметики Диофанта, о которой говорили, что она знала всю математику и всю философию своего времени, была просто-напросто убита кучкой фанатиков в мартовские иды 415 года. Возможно лишь русский математик Софья Ковалевская (1850–1891) и дочь лорда Байрона леди Лавлейс, были ей под стать. Трудно сказать, что получилось бы из чрезвычайно способного математика Милевы Марич, если бы, выйдя замуж за Эйнштейна, она смогла продолжать работать.

<sup>8</sup>Hilbert D., *Math. Ann.*, vol. 92, 1924, p. 1.

<sup>9</sup>К сожалению, в двух словах трудно объяснить, в чем именно состоял ее вклад, но он был достаточно существенным, если Гильберт был вынужден прибегнуть к помощи молодой женщины-математика.

<sup>10</sup>Напомним, что этот период начался в 1923 г. с публикации первых работ Луи де Бройля (L. de Broglie, *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, v. 177, 1923, p. 507, 548) и его диссертации (1924 г.)

<sup>11</sup>См. подраздел «Физическое мышление заявляет свои права».

<sup>12</sup>Einstein A., *Sitzungsberichte*, Preussische Akademie der Wissenschaften, 1925, p. 414. (Эйнштейн А., «Единая полевая теория тяготения и электричества», Собрание научных трудов, том II, с. 171).

<sup>13</sup>Письмо Эйнштейна Паулю Эренфесту, 26 декабря 1915 г.

<sup>14</sup>Письмо Эйнштейна Паулю Эренфесту, 18 августа 1925 г.

<sup>15</sup>После того, как он написал: «Добро пожаловать, пятое измерение!» Письмо Эйнштейна Паулю Эренфесту, 21 января 1928 г.

<sup>16</sup>Знаменитая «теорема Нётер», опубликованная в 1918 г., считается теперь одной из основных в теоретической физике. Общая теория относительности на основе этой теоремы теперь излагается в университетах, как стандартный подход.

<sup>17</sup>Среди ассистентов Эйнштейна особого упоминания заслуживает Вальтер Майер (1887–1948). Уроженец австрийского города Граца, автор замечательной книги по дифференциальной геометрии, он сопровождал Эйнштейна в США, где оставался с ним до 1934 г. и задал тон всем, кто его сменил.

<sup>18</sup>Whittaker, sir E., «History of the Theories of Aether and Electricity», Longman, Green, Londres, 1910; vol. 2, Nelson & Sons, New York, 1953.

<sup>19</sup>Lettre d'Einstein à Max Born, 12 октября 1953, *The Born–Einstein Letters*, Walker and Co., 1971, p. 199.

<sup>20</sup>Письмо Эйнштейна профессору теоретической физики Бернского университета Андре Мерсье, 9 ноября 1953 г., цитируется в Pais A., *Subtle is the Lord...*, *op. cit.*, p. 171. (Пайс А., «Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна», с. 167).

<sup>21</sup>На этой конференции Брурия Кауфман представила результаты своих последних работ, выполненных вместе с Эйнштейном. Вскоре после этого она уехала жить в kibbutz в Израиле.

<sup>22</sup>Born M., *Helvetica Physica Acta*, Suppl. IV, Berchauer Verlag Basel, 1956, p. 23. Очевидно, Борн не прочитал палермскую статью Пуанкаре, но был знаком с текстом лекции, прочитанной им на французском в Геттингене в 1911 г., за несколько месяцев до кончины. «Странно (как справедливо замечает Борн), что эта лекция оставляет впечатление, будто Пуанкаре излагал работу Лоренца». «Однако (что также справедливо), Лоренц никогда не претендовал на формулировку принципа относительности». Он добавляет: «Я привожу все эти сведения потому, что они проясняют события на арене физики пятьдесят лет тому назад [Борн выступал в 1955 г.], а не потому, что я считаю важным вопрос приоритета».

# Приложения

## Эйнштейн и «принцип Маха»

В этом кратком обзоре я попытаюсь прояснить запутывающую историю вопроса недоразумение, касающееся формулировки Эйнштейном в 1913 г. его «гипотезы относительности инерции», которую он спустя два года после кончины Маха 16 февраля 1916 г. в Хааре под Мюнхеном переименовал в *Mach'schen Prinzip* — принцип Маха.

23 сентября 1913 г. в Вене Эйнштейн сказал следующее: «... может быть и просто необходимо ожидать априори, что инертное сопротивление есть не что иное, как сопротивление ускорению рассматриваемого тела А относительно совокупности всех остальных тел В, С, и т.д. [во Вселенной]. Известно, что впервые эту точку зрения со всей остротой и ясностью выдвинул Э. Мах в своей истории механики».<sup>1</sup>

Возникает вопрос, является ли это высказывание оправданной экстраполяцией того, что Эйнштейн мог прочесть в «Механике»:

«Когда мы говорим, что тело К изменяет свое направление и скорость только под действием другого тела К', то мы вовсе не можем прийти к этому познанию, если нет налицо других тел А, В, С, ... относительно которых мы судим о движении тела К. Таким образом, мы познаем собственно некоторое отношение тела К к телам А, В, С, ... Так как в нашем распоряжении всегда имеется достаточное число неподвижных друг относительно друга или лишь медленно изменяющих свое положение тел, то мы вовсе не ограничены при этом одним определенным телом и мы можем попеременно абстрагировать то одно, то другое. Отсюда и возникло мнение, будто эти тела вообще безразличны. [...] Если мы примем во внимание, что мы не можем устранить изолированные тела А, В, С, ... и, следовательно, опытом ничего не можем решить относительно их существенной или случайной роли, [...] мы придем к тому заключению, что покуда полезно принимать, что движения определяются этими телами».<sup>2</sup>

Если в приведенной выше цитате заменить слово «движение» словом «масса», то мы получим эквивалент высказывания Эйнштейна: «... покуда полезно принимать, что массы определяются массами других тел во Вселенной». Но весь вопрос в том, насколько правомерна такая замена.

Прежде чем попытаться ответить на этот вопрос, обсудим подробнее, что понимал под словом «инерция» Мах. Луч света, попадая в сосуд с водой, преломляется. Это природное явление подчиняется закону, изложенному Декартом: «Такое преломление луча следует измерять значениями прямых



(синусов), соотносимых друг с другом, а не соотношением углов, кои называются углами преломления».<sup>3</sup>

Точно так же «инерция» есть природное явление, которое впервые «усмотрел»<sup>4</sup> Галилей и тогда же сформулировал свой закон: «Степень скорости, обнаруживаемая телом, ненарушимо лежит в самой его природе, в то время как причины ускорения или замедления являются внешними».<sup>5</sup>

Подробно рассматривая закон инерции, Мах задается существенным с его точки зрения вопросом: в каком контексте следует формулировать этот закон? Отмечая, что «...принимаемые во внимание в законе инерции направление и скорость не имеют смысла, когда этот закон относится к “абсолютному пространству”», он предлагает относить этот закон «...наивным образом к *Земле*, а для движений большого пространственного и временно-го протяжения к небу *неподвижных звезд*».<sup>6</sup> В своей *Механике* Мах употребляет выражение «закон инерции» 25 раз, но ни разу не говорит об инерции в том смысле, который вкладывает в это понятие Эйнштейн. Это совершенно очевидно — Эйнштейн часто и прямо говорит об «инерции» тела, которую он называет «инертной массой». Он, например, пишет: «На поверхности Земли на тело действуют две силы в двух в общем случае различных направлениях: одна из них, собственно сила тяжести, зависит от тяготеющей массы, а другая — центробежная сила, зависит от массы инертной».<sup>7</sup>

Для Маха существует лишь *явление*, подчиняющееся закону — закону инерции, — для Эйнштейна же, напротив, существует *физическая реальность* — инерция или инертная масса, причину которой требуется обнаружить. Онтологическое разногласие с Махом налицо. Я все же попытаюсь дать возможное объяснение такого разногласия.

На последней странице своей *Механики* Мах пишет: «Рациональное объяснение массе можно дать только признав это свойство тел, взаимно определяющее ускорение одних к другим, свойство, которое было дважды указано Галилеем и Ньютоном — один раз в общем виде, а другой раз — для частного случая, такого как закон инерции, и такое определение может быть лишь “динамическим”».<sup>8</sup>

Я выделил кавычками то слово, которое могло стать отправным пунктом для Эйнштейна. Не усмотрел ли он в этом неосуществленный замысел Маха — дать определение массы, а значит и инерции, которое будет положено в основу теории, включающей теоремы динамики... как то имеет место в общей теории относительности?<sup>9</sup>

Метаморфоза состоит вот в чем. По Маху, закон инерции — частный случай более общего закона природы — имеет смысл применительно не к «абсолютному пространству» Ньютона, а к «небу неподвижных звезд» нашей вселенной. Эйнштейн же задумал придать этому динамический смысл: «Если инерция тела повышается при скоплении масс в его окрестности, то едва ли можно отказаться от того, чтобы считать инерцию точки обусловленной существованием остальных масс. Следовательно, инерция проявляется как своего рода взаимодействие ускоряемой материальной точки со всеми остальными материальными точками».<sup>10</sup>

Отметим между прочим, что словами «своего рода взаимодействие» между материальными точками (помимо тяготения, конечно) Эйнштейн вводит в теорию квазиметафизическое «мистическое действие», которое все, и в особенности Мах, считали навсегда изгнанным из физики!

Отход Эйнштейна от такого подхода — пример постепенного мучительного разочарования в идее, которая была столь ему по душе. Называть подход Эйнштейна основанным на «принципе Маха» значит вносить путаницу, создавая впечатление, что это Мах, а не Эйнштейн повинен в отказе от самой идеи. В 1954 г., незадолго до смерти, Эйнштейн писал: «О принципе Маха больше говорить не приходится»...<sup>11</sup>

Но он нем все еще говорят, хотя теперь уже в другом контексте — в квантовой механике.<sup>12</sup>

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Einstein A., «Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems», доклад на конгрессе в Вене, 23 сентября 1913 г., *Physikalische Zeitschrift*, vol. XIV, 1913, p. 1249. А. Эйнштейн, «К современному состоянию проблемы тяготения», Собрание научных трудов, том 1, с. 296, М. Наука, 1965.

<sup>2</sup>Mach E., *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, op. Cit., Chap. II, §6. Цитируется по Э. Мах, *Механика, Историко-критический очерк ее развития*, Ижевск, 2000, с. 196.

<sup>3</sup>Descartes R., *La Dioptrique*, Discours II, Leyde, Jan Maire, 1637, p. 21.

<sup>4</sup>Вот как красиво сказано об этом у Маха: «Галилей усмотрел этот принцип непосредственным “воззрением”. Но что такое это воззрение? Человек осматривается во все стороны и вдруг усматривает нечто искомое или также неожиданное, что привлекает внимание. [...] Галилей исследует различные равномерно-замедленные движения [пуская шары по наклонной плоскости] и вдруг усматривает среди них одно движение, равномерное, бесконечное и столь странное, что появившись оно одно само по себе, оно, наверное, было бы признано движением совсем особого рода. Но ничтожное изменение угла наклона превращает это движение в конечное и замедленное, с которым мы часто встречаемся. Тут уже нет никакой трудности распознать, [что]... получается идеальная картина свободного от всяких влияний бесконечного равномерного движения». Mach E., *Die Mechanik*, op. cit. Chap. II, §10, Э. Мах, *Механика*, Ижевск, 2000, с. 235.

<sup>5</sup>Galilei G., *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica*, Leyde, 1638, Dialogo terzo. Галилей Г., Собрание трудов, том 2, с. 282, М. Наука, 1964.

<sup>6</sup>Mach E., *Die Mechanik*, Э. Мах, *Механика*, с. 236.

<sup>7</sup>Einstein A., *The Collected Papers*, v. 4, doc. 13.

<sup>8</sup>Mach E., *Die Mechanik*, Э. Мах, «Механика».

<sup>9</sup>Само использование дифференциальных уравнений для описания природных явлений уже предполагает наличие определения инерции. Именно это и подчеркивал Пуанкаре (который и сам был своего рода махистом!): «Ускорение тела зависит лишь от положений данного тела и соседних тел и их скоростей. Математики сказали бы, что движения всех молекул вещества во Вселенной описываются дифференциальными уравнениями второго порядка». H. Poincaré, *La Science et L'Hypothèse*, p. 113. Эйнштейн, похоже, искал более «физичное» определение.

<sup>10</sup>Einstein A., *The Collected Papers*, v. 4, doc. 17, §9.

<sup>11</sup>Письмо Эйнштейна Феликсу Пирани, 2 февраля 1954 г. Это замечание высказано как отрицание гипотезы относительности инерции (по Эйнштейну, это есть принцип Маха), и не относится к самому Маху, которого Эйнштейн считал одним из четырех самых читаемых им физиков — это Ньютон, Лоренц, Планк и Мах.

<sup>12</sup>Мари-Антуанет Тонеля (Marie-Antoinette Tonnelat) в работе «Histoire du principe de relativité» дает такое «современное» определение: «Локальные инерциальные свойства системы определяются распределением материи во всем пространстве».

## Вселенная Эйнштейна

*Проблемы, затрагивающие неизмеримо большое,  
бесполезны для объяснения природы.*

Бернгард Риман, доклад, прочитанный 10 июня 1854 г.  
на философском факультете Геттингена

Общая теория относительности ничего не говорит об атомах. Более того, она входит в противоречие с квантовой механикой в целом и с квантовой электродинамикой в частности, а это как раз те области знания, на которых базируются наши современные представления о мире атомов и частиц.

Эйнштейн обратил свой взор на бесконечно большое, и с 1916 г. приступил к программе исследований, надеясь, что общая теория относительности принесет плоды. Питая такую надежду, он построил модель вселенной, которая носит название «Вселенной Эйнштейна».

Однако, сразу после опубликования ее наброска три математика — астроном Виллем де Ситтер из Лейдена, Артур Стэнли Эддингтон из Кембриджа и Александр Александрович Фридман из России — раскритиковали ее основную идею, столь дорогую автору, а именно использование в модели принципа Маха. Несмотря на вызванные войной перебои в почтовой связи, а потому несколько хаотичную переписку, эти трое все же приперли Эйнштейна к стене.

Пространство–время Пуанкаре имеет метрику, компоненты которой ( $g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1, g_{44} = -1, g_{ij} = 0$  для всех  $i$  не равных  $j$ ) одинаковы «повсюду». Пространство–время общей теории относительности совершенно иное. Его метрика определяется гравитационным полем, присутствующим в пространстве, откуда следует, что если нет поля, то нет и метрики.

Рассмотрим снова расчет смещения перигелия Меркурия. Если отшелушить все побочные факторы, то окажется, что Эйнштейн, по сути, проделал следующее. Представим себе Вселенную, в которой «абсолютно ничего нет». Поместим в эту Вселенную материальную точку с массой, равной солнечной. Согласно общей теории относительности, эта точка, т.е. «масса», создает гравитационное поле, которое одновременно задает метрику пространства–времени. Определенная таким образом метрика должна, следовательно, включать в себя все мельчайшие детали поведения поля, в том числе «на бесконечности». Однако «на бесконечности», очень далеко от каких-либо масс поле постепенно сходит на нет. Оно никак не может соответствовать метрике пространства–времени Пуанкаре.

На второй странице статьи, в которой приводится расчет смещения перигелия Меркурия,<sup>1</sup> Эйнштейн приводит четыре условия, которым, по его мнению, должны удовлетворять компоненты рассчитываемого поля тяготения Солнца. Первые три полностью приемлемы — они требуют, чтобы поле было статическим и одним и тем же во всех направлениях. Четвертое же условие совершенно иного рода, оно есть то, что математики называют «граничным условием».<sup>2</sup>

Тем самым Эйнштейн предлагает принять, что на большом удалении от Солнца компоненты поля соответствуют метрике пространства–времени Пуанкаре.<sup>3</sup> Но является ли законным такой выбор граничных условий? Как

бы то ни было, он сразу вызывает фундаментальные трудности, которые вскоре осознал и сам Эйнштейн.

С точки зрения математики, трудность состоит в следующем. Граничные условия есть уравнения. Будучи принятыми, они становятся неотъемлемой частью теории, точно так же, как и основные уравнения. Для построения строгой и непротиворечивой теории они должны удовлетворять тем же постулатам, что и основные уравнения. В рассматриваемом случае они должны быть общековариантными. Однако принятые Эйнштейном граничные условия не удовлетворяют этому критерию и, следовательно, несовместимы с одним из фундаментальных постулатов теории.

Узнав в 1916 г. об этом затруднении от голландского астронома Виллема Де Ситтера, Эйнштейн пускается на хитрости.<sup>4</sup> В последней попытке спасти «принцип Маха» он предлагает изменить граничные условия, но не в своих расчетах смещения перигелия Меркурия, где он считает результат полученным, а в предложенной им «модели Вселенной». Он предлагает принять, что компоненты метрики исчезают «на бесконечности» кроме тех, что включают время [ $g_{14} = g_{41}, g_{24} = g_{42}, g_{34} = g_{43}, g_{44}$ ], притом их значения станут бесконечными! Де Ситтер тут же возразил, что это не только не спасает «принцип Маха», но и делает время на бесконечности абсолютным.

Всякого рода рассуждения по этому поводу, следовавшие за первыми стычками, сплелись в весьма запутанную картину поведения модели на «бесконечности». Наши ученые трактаты по физике теперь представляют граничные условия, использовавшиеся Эйнштейном при расчете смещения перигелия Меркурия, как безобидное «ньютоновское приближение». Но это не решает проблему. Достаточно чуть-чуть изменить граничные условия и можно получить численные значения, отличающиеся от оригинальных расчетов, которые совпадают с формулой Герберга.<sup>5</sup> Вполне может оказаться, что согласие между расчетом по общей теории относительности и формулой Герберга было лишь иллюзией.<sup>6</sup>

Из всего этого Эйнштейн извлек полезные уроки, к которым мы и обратимся в следующем разделе.

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Einstein A., *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*, Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, 1915, p. 831.

<sup>2</sup>В общем случае, всякое уравнение математической физики, *a priori*, допускает бесконечное число решений. Для решения конкретной задачи нужно, следовательно, определить «критерии отбора», позволяющие выбрать из всех возможных решений те, которые относятся к рассматриваемой задаче. Предположим, что требуется рассчитать моды колебаний кожи, натянутой на барабан. Среди всех возможных решений нужно выбрать те, где амплитуда колебаний кожи по ее окружности будет равна нулю; это будет соответствовать той области, где кожа натянута на корпус, а значит колебаться не может.

<sup>3</sup>Эйнштейн бегло излагает его несколькими словами сразу же за предыдущими тремя, как будто оно является очевидным: «На бесконечности  $g_{ij}$  принимают значения [...]  $g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1, g_{44} = -1, g_{ij} = 0$  для всех  $i$  не равных  $j$ ».

<sup>4</sup>Эйнштейн использует обозначения, отличные от обозначений Пуанкаре. Он записывает  $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$  и  $g_{44} = 1$ , что по сути ничего не меняет.

<sup>5</sup>См., например, изложение беседы Де Ситтера с Эйнштейном 29 сентября 1916 г., приведенное в работе De Sitter, *On the Relativity of Rotation in Einstein's Theory*, Koninklijke

Akademie von Wetenschappen te Amsterdam, vol. XIX, 1916, p. 531. Физик и историк науки Пьер Керсберг, работающий в университете Сиднея, привел подробное изложение переписки Эйнштейна с Де Ситтером в своей статье *Einstein–De Sitter Controversy of 1916–1917*, *Einstein and the History of General Relativity*, Birkhäuser, Boston, 1989, p. 325. Дабы воздать кесарю кесарево, отметим, что бельгийский физик Теофил де Дондер (1872–1957), известный как автор книги *La Gravifique Einstenienne*, Paris, Gauthier–Villars, 1921, отрезанный в Брюсселе от всего мира германской оккупацией в Первую Мировую войну, первым получил многие из описанных здесь результатов. К сожалению, де Дондер смог вкушать плоды своих усилий лишь гораздо позже, только после окончания войны.

В своей работе *Attraction of Gravitation*, Boston, Birkhäuser, 1993, Джон Ирмен и Майкл Янссен, сотрудники университета Питтсбурга, с блеском детально анализируют расчет смещения перигелия Меркурия. К сожалению, они просто принимают все граничные условия без их анализа. Их анализ затрагивает также отклонение лучей света при прохождении около Солнца. Этот расчет также проводился Эйнштейном в ньютоновском приближении.

<sup>6</sup>Эйнштейн не всегда игнорировал Пуанкаре. Чтобы предотвратить «схлопывание» своей вселенной под действием сил притяжения, он без колебаний применил один из подходов Пуанкаре, который, в свою очередь старавшийся предотвратить «взрыв» электрона Лоренца, высказался в статье 1905 г. следующим образом. «Возможное объяснение сокращения [электрона Лоренца] можно получить, предположив, что деформируемый и сжимаемый электрон испытывает некоего рода [внутреннее] давление, работа которого пропорциональна изменению объема». И далее он добавляет: «Есть основания полагать, что существуют определенные соотношения между причиной, вызывающей тяготение, и причиной, создающей этот дополнительный потенциал». Подхватывая эту идею, Эйнштейн пишет в 1921 г.: «Вещество состоит из элементарных электрически заряженных частиц. [...] Для объяснения того факта, что частица может существовать несмотря на отталкивание, производимое друг на друга ее одноименно заряженными частями, [...] Пуанкаре предположил, что внутри такой частицы имеется отрицательное давление, компенсирующее электростатическое отталкивание. Вряд ли такое давление исчезает за пределами частицы. Более удовлетворительным решением проблемы было бы введение в наше феноменологическое описание члена, соответствующего давлению». Введение Эйнштейном в 1917 г. «космологической постоянной», представляющей такое давление, и последующий отказ от нее в 1931 г. есть пролог к окончательному отходу от «принципа Маха» в 1954 г. В письме, написанном Эйнштейном Мишелю Бессо за несколько месяцев до кончины, в последнем письме своему старому другу, Эйнштейн сообщает о своих недавних попытках справиться с трудностями, возникшими в модели его вселенной. Признав, что они привели к «накоплению выражений, не имеющих никакой логической связи», он мудро замечает: «Мне достает веры и убежденности в том, что наша Вселенная устроена совсем не так». Письмо Эйнштейна Мишелю Бессо, 10 августа 1954 г., цитируется по книге Speziali P., *Correspondance avec Michele Besso*, Hermann, coll. “Savoir”, Paris, 1979, doc. 210.

## Возвращение эфира

Во введении к статье по теории относительности 1905 г. Эйнштейн поместил фразу, которая постоянно привлекала к себе внимание. Он заявил:

«Введение “светоносного эфира” окажется излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится “абсолютно покоящееся пространство”, наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в котором протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-нибудь вектор скорости».

Одним из тех, кто сразу заметил проблемы такого подхода, был Абрагам. В статье 1914 г. он поясняет:

«Многочисленные сторонники теории относительности пришли к заключению, что первый постулат этой теории [принцип относительности] позволяет избавиться от среды, заполняющей пространство, т.е. от “эфира”. В самом деле, вследствие этого постулата эфир не участвует в равномерном прямолинейном движении, однако»...

«Однако, как совершенно справедливо указал Пауль Эренфест, второй постулат — постулат постоянства скорости света, становится убедительным лишь принимая во внимание теорию электромагнитных волн. Отсюда с очевидностью следует, что теория относительности основывается на теории электромагнитного поля, а этот факт сторонники теории не любят признавать».<sup>1</sup>

В конце концов и Эйнштейн будет вынужден согласиться с такой точкой зрения.

Выступая в Лейденском университете 5 мая 1920 г. (в присутствии Лоренца!), он допускает возможность возвращения к эфиру.

«Согласно общей теории относительности, пространство немислимо без эфира; действительно, в таком пространстве не только было бы невозможно распространение света, но не могли бы существовать масштабы и часы и не было бы никаких пространственно-временных расстояний в физическом смысле слова».

В заключение он говорит:

«Однако этот эфир нельзя представить состоящим из прослеживаемых во времени частей; таким свойством обладает только весома материя; точно так же к нему нельзя применять понятие движения».<sup>2</sup>

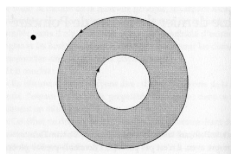
Одним словом, прав был Ньютон, а не Декарт! Абсолютное пространство «существует»! В виде чего?... Вот уж воистину не следует быть святее Папы Римского...

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Abraham M., «Die neue Mechanik», *Scientia*, 1914, vol. XV, p. 8.

<sup>2</sup>Эйнштейн А., «Эфир и теория относительности». Речь, произнесенная 5 мая 1920 г. в Лейденском университете, Собрание научных трудов, т. 1, с. 689.



## Последняя теорема Пуанкаре

Пуанкаре оставил после себя сироту — свою «последнюю теорему», которой он, по его словам, не смог найти общее доказательство.

В Геттингене, в «читалке» молодые математики обещают друг другу, что как-нибудь в дождливый субботний вечерок они выкроют немного времени, чтобы ее доказать. Многие пытаются, но безуспешно.

«Я показал, — говорит Пуанкаре, — существование периодических решений задачи трех тел, однако результат меня не удовлетворяет, поскольку хотя и было установлено существование частных решений для масс малой величины, не ясно, как получить такие решения для больших масс [т.е. для Солнца, Земли и Луны]. Размышляя над этой проблемой, я пришел к выводу, что ответ должен зависеть от справедливости или ложности некой теоремы геометрии, формулирующейся весьма просто. Поэтому я решил проверить справедливость этой теоремы, но натолкнулся на неожиданные затруднения».<sup>1</sup>

Поясним, о чем идет речь. Рассмотрим кольцо, образованное двумя окружностями — внешней  $a$  и внутренней  $b$ . Пуанкаре рассматривает точечные преобразования — каждой точке ставится в соответствие другая точка, которая оставляет неизменной площадь кольца и ставит в соответствие одной точке кольца другую точку. Одним словом, это преобразует данное кольцо в другое кольцо, но с одним ограничением: любая точка, расположенная либо на внутренней, либо на внешней окружности, должна преобразовываться в точку на той же самой окружности. «Это означает, — поясняет Пуанкаре, — что такое преобразование вызывает вращение каждой окружности таким образом, что все точки каждой окружности перемещаются в одном и том же направлении, хотя в общем случае и на неравные расстояния, но так, что обе окружности вращаются в противоположных направлениях».<sup>2</sup>

Он так формулирует свою теорему: «Если эти два условия выполняются, то я утверждаю, что внутри кольца всегда существуют две точки, которые не изменяются в результате преобразования». Иначе говоря, эти две точки всегда остаются «на месте».

Теорема сама по себе занята и необычна, но чем она важна? Она важна тем, говорит Пуанкаре, что «может применяться к задачам динамики с двумя степенями свободы». Он приводит два примера — «геодезических на выпуклой поверхности» и «частного случая задачи трех тел».

Можно представить себе насколько были поражены геттингенские математики, обнаружив, что раньше них, всего через год после смерти Пуанкаре теорему для общего случая доказал кто-то никому неизвестный, притом американец, некто Джордж Биркхоф!\*

\* \* \* \* \*

\* Джордж Дэвид Биркхоф (Биркгоф), 1884–1944, один из лучших американских математиков своего поколения. — (прим. перев.)

## Примечания

<sup>1</sup>Poincaré H., *Sur un théorème de Géométrie*, Rendiconti del Circolo matematico de Palermo, t. 33, 10 марта 1912 г., p. 375–407.

<sup>2</sup>Не любивший чертежи Пуанкаре в данном случае был вынужден неоднократно прибегнуть к ним. Его статья содержит 24 рисунка! Он даже извинился перед редактором: «Меня весьма смущает, что я был вынужден поместить столь большое число рисунков, но это вызвано именно тем, что мне не удалось найти общее правило, а потому я поместил множество частных решений».



## Пуанкаре и физика XXI века

В статье «Математические труды Пуанкаре», опубликованной в *Acta mathematica* в 1921 г., современник Пуанкаре математик Жак Адамар (1865–1963) заметил, что тот выбирал темы своих работ «не из тех, что ему были ближе по духу, а из тех, в которых нуждалась наука».<sup>1</sup>

В этой книге мы уже представили непреходящий вклад Пуанкаре в физику — создание им пространства–времени. В заключение, рассмотрим еще одно из его достижений, намного опередившее свое время и которое только сейчас мы можем оценить по достоинству. Он обнаружил один из геометрических «столпов», на который сегодня опирается *теория струн*. Некоторые полагают, что именно она станет «физикой XXI века».

Для начала обратимся к знаменитой теореме Эйлера,<sup>2</sup> согласно которой «если  $S$ ,  $A$  и  $F$  есть, соответственно, числа граней, рёбер и вершин любого выпуклого многогранника, то справедливо выражение  $S - A + F = 2$ ».

Приведенная теорема Эйлера в данной формулировке применима лишь к выпуклым многогранникам, а как она формулируется в общем виде?

Именно этот вопрос и задал себе Пуанкаре. Прежде чем подойти к конечной цели, рассмотрим ход его рассуждений, а для того представим себе накачанную автомобильную камеру. Математики называют такой объект «тором». На сфере можно, не отрываясь от ее поверхности, соединить любые две точки. То же можно проделать и на торе, но... Если на поверхности сферы провести любую замкнутую кривую, она поделит поверхность на две ограниченные этой кривой области; притом невозможно перейти из одной области в другую, не пересекая их границы. Такая замкнутая кривая делит поверхность на две «несвязные» области. На поверхности тора все иначе — некоторые замкнутые кривые там не делят поверхность на две несвязные области.<sup>3</sup> Говорят, что сфера и тор топологически различны.

Пуанкаре отмечает, что всегда можно превратить куб в сферу, накачав его, как шарик.<sup>4</sup> Он говорит:

«Тот факт, что грани многогранника есть плоскости, очевидно не имеет никакого значения. Теорема Эйлера справедлива и для искривленных многогранников. Она справедлива и для любых замкнутых поверхностей, заключенных в области с простой связностью; эти области соответствуют граням многогранника, кривые, служащие границами между двумя такими областями, соответствуют его ребрам, а оконечности кривых соответствуют вершинам».

Говорят, что куб «гомеоморфен» сфере. Аналогично, любой многогранник, в котором проделан «туннель», гомеоморфен тору. В таком случае теорема Эйлера записывается не в виде  $S - A + F = 2$ , а в виде  $S - F + A = 0$ . Теперь значение выражения  $S - F + A$ , соответствующее данному многограннику, называют «характеристикой Эйлера–Пуанкаре» и говорят, что она есть «топологический инвариант».<sup>5</sup>

Пуанкаре определяет «род» многогранника, положив  $g = 0$  для сферы,  $g = 1$  для тора,  $g = 2$  для «двойного тора» и т.д. В результате рассуждений «редких по изяществу», которые я здесь не буду приводить, он получает следующие результаты:

1. Характеристика Эйлера–Пуанкаре  $S - A + F$  для поверхности рода  $g$  имеет величину  $2 - 2g$ ;

2. Если удалить одну из граней заданного многогранника, превратив его поверхность в «открытую» поверхность с  $f$  «свободных» границ, то топологический инвариант принимает значение  $2 - 2g - f$ .

## Теория струн

В последние четверть века многие физики–теоретики пытаются описать свойства элементарных частиц, рассматривая их как различные виды колебаний квантовых объектов практически бесконечно малых размеров — «струн» или, согласно недавним представлениям, двумерных «мембран».

Согласно общей теории относительности, материальная точка — «пробная частица» — перемещается в пространстве по геодезическим, кратчайшим линиям данного пространства. Согласно же квантовой механике, все обстоит не так — когда частица может попасть из одной точки в другую различными путями, она не «выбирает» какой-то один из них, а «следует» по всем возможным путям.<sup>6</sup> Если частица считается точечной, то ее путь представляет собой мировую линию в пространстве–времени, а ее распространение описывается в виде суммы, взятой по всем мировым линиям, соединяющим исходное и конечное положения. Если же частица представляется «струной», то мировые линии превращаются в «ленты». Сумма, взятая по этим лентам, есть сумма, взятая по поверхностям.<sup>7</sup>

В точечной теории взаимодействие между частицами осуществляется в результате соударения. В теории струн две ленты сливаются в месте их взаимодействия и результатом является снова лента! И так всегда, вне зависимости от числа взаимодействий. То есть, невозможно провести различие между одной распространяющейся лентой и многими сливающимися и расходящимися лентами.

Невозможно сказать и в какой именно точке пространства–времени происходит взаимодействие. Так мы естественно приходим к необходимости изучать «топологические» свойства поверхностей, т.е. их неотъемлемые свойства (не зависящие от выбранного представления поверхности).

Методы, разработанные специалистами в этой области, предполагают знание классификации поверхностей, которые используются в вычислениях.<sup>8</sup> Вот тут-то и пригождается характеристика Эйлера–Пуанкаре. Являясь «топологическим инвариантом», она позволяет правильно построить и упростить вычисления.

Многие физики сейчас полагают, будто теория струн — слишком «математическая» теория, лишенная «физического принципа», который оправдывал бы ее статус *физической теории*. В этой связи они часто упоминают «принцип эквивалентности», как пример физического подхода, который в итоге привел к созданию общей теории относительности, полностью игнорируя тот факт, что этот принцип, как теперь ясно, несправедлив. Как мы упоминали выше, даже крохотная капелька дождя в свободном падении запросто нарушает этот принцип.

Предлагаем им поискать «фундаментальный физический принцип», которого якобы не достает в теории струн, на основе следующего подхода.

Общая теория относительности содержит поля — электромагнитное и гравитационное, однако она вынуждена рассматривать материю в виде «протертого супчика». В этом супе несомненно найдется достаточно места для

струн. Более того, число измерений пространства-времени, которое, согласно теории струн, может составлять 10 или даже 26, не должно мешать распространению струн — одномерная струна повсюду чувствует себя, как рыба в воде.

Есть важная, а может быть и решающая причина, по которой теорию струн следует принимать всерьез. Одна из мод колебаний струны должна представлять *гравитон* — последнюю из сонма частиц, которой пока не хватает в физике.

Если это удастся сделать, открытие *гравитона* — «переносчика»<sup>9</sup> гравитационного взаимодействия, положит конец той особой роли, которую общая теория относительности приписывает силе тяготения, в отличие от всех других известных в физике сил, каждая из которых имеет своего переносчика.

Но это уже совершенно другая история. Предлагаю заинтересованному читателю познакомиться с теорией струн по специальной литературе. В его пользу будет приобретенное здесь знание той роли, которую играет «топологический инвариант» Эйлера–Пуанкаре  $S = A + F$ .

\* \* \* \* \*

## Примечания

<sup>1</sup>Hadamard J., «L'oeuvre mathématique de Poincaré», *Acta mathematica*, 1921, t. XXXVIII.

<sup>2</sup>Poincaré H., *Analysis Situs*, Journal de l'École polytechnique, t. 1, 1895, § 16. Читатель может легко убедиться в справедливости этой теоремы, взяв многогранник по своему выбору. Так, для куба получим  $6 - 12 + 8 = 2$ , а для треугольной пирамиды  $4 - 6 + 4 = 2$ .

<sup>3</sup>Например, если замкнутая линия образует кольцо.

<sup>4</sup>Это справедливо и в общем случае. Любой выпуклый многогранник можно «накачать воздухом» так, что он примет форму сферы. Говорят, такие многогранники гомеоморфны сфере.

<sup>5</sup>Отметим результат, представляющий общий интерес. Характеристика Эйлера–Пуанкаре компактной поверхности связана с кривизной полной поверхности.

<sup>6</sup>Это может показаться читателю, не знакомому с квантовой механикой, чрезвычайно странным. Тем не менее, в рамках современных физических представлений, оказывается, что при перемещении из одной точки в другую элементарная частица распространяется по всем возможным путям «сразу». По крайней мере, так приходится считать, чтобы правильно проводить вычисления. Отметим в этой связи очень примечательное высказывание Маха в его *Механике*: «В настоящее время мы знаем, что свет распространяется всеми путями, но что только на путях кратчайшего времени световые волны настолько усиливаются, что получается заметный результат. Таким образом, только кажется, что свет распространяется только по пути кратчайшего времени». Э. Мах, *Механика*, гл. IV, II–7, с. 392.

<sup>7</sup>Верно и обратное: любую сумму, взятую по поверхности, можно представить как распространение струны.

<sup>8</sup>Особое место в этой классификации занимают три поверхности: комплексная плоскость, полуплоскость и сфера Римана. Все они «связные», но «конформно неэквивалентные» — сфера компактна, а две плоскости — нет.

<sup>9</sup>В современной квантовой механике взаимодействия между частицами осуществляются посредством обмена «переносчиками» сил, которые также являются частицами. Переносчиком электромагнитного взаимодействия является не кто иной как фотон. Сила, удерживающая в ядре кварки, переносится «глюоном», который сам является кварком. Гравитон, который как предполагается переносит гравитационное взаимодействие, пока не входит в «единую» семью известных в природе сил.

# Именной указатель

- Абрагам (Макс), 52–56, 63, 76, 79, 80, 100, 101, 105, 110, 111, 113, 116, 117, 120, 134, 136, 158, 161, 182
- Адамар (Жак), 185
- Адлер (Фридрих), 123–126, 131
- Ампер (Андре Мари), 12, 13, 15, 17, 18, 44, 88
- Ашпель (Поль), 58, 59, 66, 138
- Араго (Франсуа Доминик), 12, 16, 17
- Аристотель, 16, 18
- Бессо (Мишель), 49–51, 82–84, 86–89, 95, 119, 123, 124, 131, 153, 154, 159, 163, 166, 181
- Биркхоф (Джордж), 183
- Борн (Макс), 102, 110, 119, 124, 125, 143, 145, 158, 166, 169, 171, 173–175
- Брэдли (Джеймс), 4, 27
- Вебер (Вильгельм), 13–15, 32, 56
- Вин (Вильгельм), 38, 39, 52, 128, 130
- Габихт (Конрад), 47, 49, 83, 84, 109
- Газенорль (Фридрих), 130
- Галилей (Галилео), 3, 4, 9, 10, 34, 37, 43, 66, 77, 96, 122, 156, 177, 178
- Гаусс (Карл Фридрих), 13–15, 17, 28, 32, 56, 73, 143–145, 149, 160
- Гербер (Пауль), 107, 108, 153, 164, 180
- Гильберт (Давид), 20, 26, 110, 116, 117, 119, 121, 122, 138, 140, 141, 152, 160–168, 171–173
- Громмер (Якоб), 161, 167
- Гроссман (Марсель), 46, 50, 121, 133, 141–143, 147, 148, 152–155, 160, 173
- Гурвиц (Адольф), 26
- Гюйгенс (Христиан), 5, 6
- Декарт (Рене), 2, 23, 37, 38, 43, 53, 74, 76, 78, 82, 176, 182
- Дондер де (Теофил), 181
- Дюкас (Элен), 86, 173
- Зоммерфельд (Арнольд), 116, 122, 124, 125, 130, 131, 140, 141, 143, 144, 173
- Картан (Эли), 138, 172
- Кауфман (Брурия), 173–175
- Кауфман (Вальтер), 52, 55, 56, 105, 110, 111, 113, 120
- Клейн (Феликс), 24–27, 29, 110, 116, 117, 121, 122, 131, 160
- Коттлер (Фридрих), 143, 144, 148, 149
- Кюри (Пьер и Мария), 58, 127, 130, 133
- Лагранж (Жозеф Луи), 6, 7, 53, 78, 80, 105, 125, 126, 160, 167
- Лампа (Антон), 126, 127, 141
- Ланжевен (Поль), 58, 59, 62, 63, 80, 127, 129, 155
- Лаплас (Пьер-Симон), 17, 32, 125
- Лармор (Жозеф), 36, 59, 65
- Лауб (Якоб), 113
- Лауэ фон (Макс), 80, 113, 121, 129, 143, 144
- Леверье (Урбэн), 107, 164
- Леви-Чивита (Туллио), 116, 117, 122, 143
- Ли (Софус), 72
- Ловенталь-Эйнштейн (Эльза), 133, 152, 172, 173
- Лодж (Оливер), 36
- Лоренц (Хендрик Антон), 31–39, 41, 53, 54, 57, 58, 62–68, 70, 75, 78–80, 93, 95–97, 100, 101, 103, 105, 111–113, 116, 118, 128, 130, 133, 134, 136, 139, 141, 151, 155, 158, 159, 166, 168, 170, 174, 175, 178, 182
- Майер (Вальтер), 172, 173, 175
- Майкельсон (Альберт), 30, 31, 60, 113
- Максвелл (Джеймс Клерк), 14–18, 32, 33, 35, 36, 40, 41, 53, 78, 88–90, 99, 100, 141, 162
- Марич (Милева), 50, 85, 175

- Мах (Эрнст), 48, 89, 104, 123–127, 130, 131, 140–143, 148, 150, 154–157  
 Мерсенн (Марен), 3, 23  
 Ми (Густав), 115, 141, 143, 153, 157, 158, 161, 162  
 Минковский (Герман), 20, 26, 64, 69, 76, 96, 110, 116–120, 124, 141, 143, 145, 146, 153, 159  
 Морли (Эдвард), 30, 36, 113  
 Нернст (Вальтер), 126, 127, 129, 130, 133, 134, 155  
 Ноэль (Эмиль), 127  
 Ньюком (Саймон), 107  
 Ньютон (Исаак), 5, 15, 17, 37, 38, 43, 44, 53, 65, 91, 97, 100, 102, 105–108, 120, 135, 149, 154, 155, 163, 164, 170, 171, 177, 178, 180, 182  
 Нётер (Фриц), 160, 173  
 Нётер (Эмми), 160, 162, 167, 171, 173, 175  
 Пайс (Абрахам), 37, 49, 50, 104, 109, 113, 121, 131, 141, 150, 163, 166–168, 175  
 Паскаль (Блез), 23  
 Петцольд (Йозеф), 148, 150, 151  
 Пик (Георг), 127, 141, 143  
 Планк (Макс), 50, 83, 104, 112, 113, 121, 124, 130, 131, 133, 135, 136, 139, 141, 152, 153, 155, 178  
 Понселе (Жан Виктор), 23, 24  
 Пуассон (Дени), 16, 32, 54, 126, 147  
 Риман (Бернгард), 13–15, 32, 56, 131, 143, 145, 160, 163, 179, 187  
 Ситтер де (Виллем), 108, 169, 170, 179, 180  
 Соловин (Морис), 46, 47, 49, 50, 83, 88  
 Сольве (Эрнест), 126, 127  
 Спиноза (Барух), 48, 82, 153, 174  
 Стокс (Джордж Габриель), 8, 33, 36, 39  
 Томсон (Вильям, лорд Кельвин), 105  
 Томсон (Джозеф Джон), 39, 59, 170  
 Фарадей (Майкл), 15–18, 32  
 Физо (Арман Ипполит), 8–10, 28, 41  
 Фицджеральд (Джордж Фрэнсис), 31, 33, 36, 39, 54  
 Фогт (Вольдемар), 31–34, 37, 39, 101, 119, 149  
 Френель (Огюстен), 8, 9, 16, 28, 33, 35, 36, 39, 77  
 Фридман (Александр Александрович), 179  
 Фукс (Лазарус), 26, 29  
 Хабер (Фриц), 133, 152  
 Хевисайд (Оливер), 39  
 Штарк (Йоханнес), 112–114, 124  
 Эддингтон (Артур Стэнли), 169, 170, 179  
 Эйлер (Леонард), 5, 6, 28, 78, 125, 185–187  
 Эренфест (Пауль), 121, 127, 128, 134, 153–155, 166, 168, 172, 175, 182  
 Эрстед (Ханс Кристиан), 11, 12, 17

# Предметный указатель

- абerrация, 3–6, 8, 9, 11, 26–28, 30, 35,  
36, 38, 41, 57, 60, 65, 77, 100,  
101
- академия *Олимпия*, 47–50, 82, 123
- волновое уравнение, 7, 10, 32, 33, 36,  
54
- время, 91, 92, 94, 97, 99, 113, 115
- абсолютное, 44, 48, 49
  - истинное, 66, 93, 94, 97
  - местное, 34, 36, 40, 66, 93–97, 113–  
115
  - мнимая координата, 74
  - покоя, 94
  - покоящейся системы, 93
- геометрия, 145–147, 161, 183
- дифференциальная, 142–145, 175
  - евклидова, 49, 91, 138, 139, 145
  - неевклидова, 73, 146
  - проективная, 23, 24
- группы теории, 49, 70–72, 75, 106, 118,  
138
- группа Лоренца, 75, 87, 102
- группа преобразований, 25
- доплер-эффект, 31, 32
- дуальности принцип, 23–25
- инварианты, 23, 25, 28, 63, 72, 73, 78,  
87, 100, 104, 113, 118, 121,  
126, 130, 147, 149, 150, 156,  
160, 162, 173, 185–187
- квантовая механика, 56, 102, 126, 134,  
136, 137, 173, 178, 179, 186,  
187
- кванты световые, 104, 131
- ковариантность общая, 141, 147, 148,  
151, 155, 157, 160, 162, 163,  
165, 166, 180
- метрика, 145–147, 150, 151, 153, 163,  
167, 179, 180
- мистическая гексаграмма, 23, 24
- многообразие, 25, 145, 149
- опыт Майкельсона и Морли, 31, 33,  
36, 41, 60, 97, 113
- параллакс, 3, 4
- поле магнитное, 32
- поле тяготения, 81, 114, 115, 134, 142,  
145–149, 151–156, 162–166, 179,  
186
- поле электромагнитное, 35, 40, 53, 54,  
57, 66, 70, 79, 81, 99–101, 113,  
162, 182, 186
- поле электрона, 53, 54, 79
- поля единая теория, 162, 171–173
- постоянство скорости света, 89, 100,  
134, 156, 182
- потенциал, 14, 32, 54, 55, 68, 147, 162,  
181
- преобразования Лоренца, 32, 65, 70–  
75, 78, 79, 87, 89, 97, 99–101,  
103, 106, 110, 113, 121
- принцип Маха, 142, 157–159, 176–181
- принцип единственности, 148, 151
- принцип наименьшего действия, 78,  
121
- принцип относительности, 9, 34, 37,  
44, 57, 60, 66, 70, 77, 80, 87,  
89, 92, 99, 101, 110, 111, 113–  
117, 121, 124, 128, 135–137,  
139, 142, 152, 153, 158, 175
- принцип эквивалентности, 114, 142,  
149, 156, 158, 186
- пространство–время, 25, 55, 62, 64,  
66, 87, 119, 143, 145–148, 172,  
179
- рефракция, 7, 9
- сила Лоренца, 35, 36, 53, 78, 99, 100,  
104
- симметрия, 97, 118, 149, 150, 156
- смещение перигелия Меркурия, 106–  
109, 120, 153, 163–166, 168,  
170, 179–181
- сохранения законы, 60, 102, 124, 155,  
156, 158
- струн теория, 131, 185–187
- тензоры, 118, 143, 147–150, 156, 162,  
165, 168

теорема Пифагора, 30, 72, 73, 144,  
145, 149  
теорема Пойнтинга, 40, 80  
уравнения Максвелла, 32, 35, 78, 99,  
100, 104, 141  
форма квадратичная, 21, 72–74, 76,  
118, 144, 149  
характеристика Эйлера–Пуанкаре, 185,  
186  
эфир, 5, 6, 8, 30, 33–36, 39, 41, 54, 59,  
65, 66, 79, 88, 90, 98, 101,  
113, 130, 136, 142, 152, 174,  
182  
его увлечение, 8–10, 27, 28, 33

# Оглавление

<b>Предисловие</b>	<b>2</b>
<b>Странные вопросы</b>	<b>3</b>
Аберрация света . . . . .	3
Капитан Пьерони наблюдает звезды . . . . .	3
Модели Эйлера . . . . .	5
Как распространяется свет? . . . . .	7
Электродинамика . . . . .	11
«Ужасающие опыты» . . . . .	11
«Электрические столкновения» . . . . .	11
Точечные законы . . . . .	13
Электромагнетизм . . . . .	14
Электричество по Максвеллу . . . . .	16
<b>Идеи и люди</b>	<b>19</b>
Знакомьтесь – Анри Пуанкаре . . . . .	19
Анри Жюль . . . . .	19
Пуанкаре в Горном институте . . . . .	21
Математики . . . . .	23
Принцип дуальности . . . . .	23
Эрлангенская программа . . . . .	24
Клейн испытывает потрясение, . . . . .	
и впадает в депрессию . . . . .	25
Пуанкаре интересуется аберрацией . . . . .	26
Тайна сгущающая . . . . .	30
Неприятности Альберта Майкельсона . . . . .	30
Совпадения . . . . .	31
В дело вмешивается электрон . . . . .	32
Лоренц предлагает странный способ	
описания электрона . . . . .	33
Лоренц изобретает <i>електрисче Крафт</i> . . . . .	35
<i>Умшялзунг!</i> . . . . .	38
Пуанкаре читает курс по теории Лоренца . . . . .	38
Новые веяния в физике . . . . .	38
... Обращаясь к местному времени Лоренца . . . . .	40
... И ставит Лоренца в трудное положение . . . . .	41
Пуанкаре предвидит новый «общий закон природы» . . . . .	43
Момент открытия . . . . .	43
Ньютон формулирует свою систему мира . . . . .	43
Знакомьтесь — Альберт Эйнштейн . . . . .	46
Эйнштейн поступает в Федеральное бюро	
промышленной собственности . . . . .	46



Эйнштейн основывает <i>Академию Олимпия</i> . . . . .	47
Эйнштейн читает Пуанкаре . . . . .	48
Бессо присоединяется к Эйнштейну в Берне . . . . .	49
<b>Начало большого пути</b> . . . . .	<b>52</b>
Кауфман и Абрагам расчищают путь . . . . .	52
Молодая геттингенская гвардия . . . . .	52
Поле, рассматриваемое как ««фиктивная жидкость»» . . . . .	53
Электрон Абрагама . . . . .	54
Пуанкаре формулирует принцип относительности . . . . .	57
Электрон ««реальный»» и электрон ««фиктивный»» . . . . .	57
««Пляж Сорбонны»» . . . . .	58
И снова за дело береца Пуанкаре . . . . .	60
... И создает пространство-время . . . . .	62
Посреди Атлантики Пуанкаре создает пространство-время . . . . .	62
Четырехмерное пространство . . . . .	62
Генезис открытия . . . . .	63
Пуанкаре приводит в порядок ««преобразования Лоренца»» . . . . .	65
Эталон краткости . . . . .	65
По Лоренцу, эфир ««неподвижен»», но существует ли он на самом деле? . . . . .	65
Самое главное... . . . .	66
Как преобразовать заряд электрона . . . . .	67
Преобразование потенциалов . . . . .	68
Полная победа . . . . .	69
Пуанкаре вторгаются в физику XIX века . . . . .	70
Грандиозная идея . . . . .	70
Преобразования Лоренца образуют группу! . . . . .	70
Вернемся к теореме Пифагора . . . . .	72
Мнимая координата времени . . . . .	73
$l = 1$ . . . . .	74
Релятивистская динамика Пуанкаре . . . . .	77
Новая кинематика, новая динамика . . . . .	77
Пуанкаре ссылается на принцип наименьшего действия . . . . .	78
... И интересуется массой электрона . . . . .	78
Что скрывается за символами . . . . .	80
<b>Эйнштейн принимает за работу</b> . . . . .	<b>82</b>
В поисках истинных идей . . . . .	82
Последователь Спинозы . . . . .	82
Да здравствует напор! . . . . .	83
Эйнштейн пишет прославившую его статью . . . . .	84
««Последователь»» Пуанкаре . . . . .	87
Как обстояло дело . . . . .	87
В дело вступает Мишель Бессо . . . . .	87
В отраженном свете Пуанкаре . . . . .	87
Фальшивая нота . . . . .	89
А как быть с эфиром? . . . . .	89
Относительность есть ««оптическая иллюзия»»! . . . . .	91
Последователь Ньютона . . . . .	91
Одновременность по Эйнштейну . . . . .	91
Эйнштейн выводит формулу для местного времени . . . . .	92
Шляпа фокусника . . . . .	94
Относительность пространства . . . . .	95

Снова $l = 1$ . . . . .	96
Эйнштейн завершает прославившую его статью . . . . .	99
Фундаментальная трудность . . . . .	99
Сила Лоренца открыта заново . . . . .	100
Незначительная ошибка, и тем не менее . . . . .	100
Дополнения . . . . .	101
<i>Как и должно быть</i> . . . . .	101
Попытка спастись . . . . .	102
Тавтология Эйнштейна . . . . .	102
<b>Переходный период</b> . . . . .	<b>105</b>
А тяготение? . . . . .	105
Пуанкаре формулирует задачу . . . . .	105
Меркурий озадачивает . . . . .	106
Интерлюдия . . . . .	110
Новичок . . . . .	110
Лоренц в Америке . . . . .	110
Пуанкаре раздосадован . . . . .	111
Обзор состояния дел...но не совсем полный . . . . .	112
«Счастливейшая мысль в моей жизни» . . . . .	114
<i>Эйнштейн? Как же, помню!</i> . . . . .	115
Тревожный звоночек . . . . .	116
<i>Пространство и время</i> . . . . .	117
Планы на будущее... . . . .	118
Пуанкаре в Геттингене . . . . .	119
Эйнштейн в стране Маха . . . . .	123
Эйнштейну помогает последователь Маха . . . . .	123
Новый сосед . . . . .	125
Эйнштейн в Праге . . . . .	126
Пуанкаре выдвинут на Нобелевскую премию . . . . .	127
Тревога! . . . . .	128
Проказы Ланжевена . . . . .	129
Дискуссия Эйнштейна и Пуанкаре в Брюсселе . . . . .	129
Последние дни Пуанкаре . . . . .	133
Портрет Эйнштейна работы Пуанкаре . . . . .	133
Эйнштейн ворошит муравейник . . . . .	133
Пуанкаре интересуется атомом . . . . .	134
Последние мысли . . . . .	136
Смерть Пуанкаре . . . . .	138
<b>Общая теория относительности</b> . . . . .	<b>140</b>
Повторица ли история? . . . . .	140
Передача эстафеты . . . . .	140
Эйнштейн покидает Прагу . . . . .	141
Еще немного математики, но в последний раз . . . . .	144
Перечитаем Гаусса . . . . .	144
От Гаусса к Риману . . . . .	145
Величины $g_{ij}$ описывают гравитационное поле . . . . .	145
Драматический момент . . . . .	147
Принцип единственности . . . . .	148
Чёртик в дыре дурачит Эйнштейна . . . . .	151
Что делать? . . . . .	151
Эйнштейн избран членом Прусской Академии наук . . . . .	152
Посиделки у Эйнштейна в Цюрихе . . . . .	153

Эйнштейн пишет Маху . . . . .	154
Горький привкус и поворот на 180 градусов . . . . .	155
Стычка Ми с Эйнштейном . . . . .	157
Снова математики . . . . .	160
В Геттинген приезжает Эмми Нётер . . . . .	160
У Эйнштейна появляеца ассистент . . . . .	160
Гильберт выходит на охоту . . . . .	161
Аксиоматическая теория . . . . .	162
Физическое мышление заявляет свои права . . . . .	163
Эйнштейн представляет свои вычисления в Прусскую Академию наук . . . . .	164
Заложник славы . . . . .	169
Перемирие . . . . .	169
Канонизация Эйнштейна . . . . .	170
В поисках единой теории поля . . . . .	171
Одиночество . . . . .	173
Завещание Эйнштейна . . . . .	173
<b>Приложения</b>	<b>176</b>
Эйнштейн и «принцип Маха» . . . . .	176
Вселенная Эйнштейна . . . . .	179
Возвращение эфира . . . . .	182
Последняя теорема Пуанкаре . . . . .	183
Пуанкаре и физика ШПИИ века . . . . .	185
Теория струн . . . . .	186
<b><i>Именной указатель</i></b>	<b>188</b>
<b><i>Предметный указатель</i></b>	<b>190</b>