

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

530.1(09)

**ДОКЛАД А. ПУАНКАРЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА
НАКАНУНЕ СОЗДАНИЯ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ***И. Ю. Кобзарев*

ВВЕДЕНИЕ

Великий французский математик Анри Пуанкаре внес важный вклад в развитие теоретической физики своего времени и являлся одним из ведущих теоретиков своего поколения. Наряду с оригинальными работами Пуанкаре большое внимание привлекали и его обзорные доклады на съездах, конференциях, собраниях научных обществ. Многие из них содержатся в книгах А. Пуанкаре: «Наука и гипотеза», «Ценность науки», «Наука и метод» и «Последние мысли» *). Эти книги были широко известны в 900-е годы; европейской известностью пользовался также многотомный «Курс математической физики» А. Пуанкаре, основанный на лекциях, читавшихся Пуанкаре на кафедре математической физики, которую он занимал с 1886 по 1896 г.

Доклад в Сент-Луисе ⁵, сделанный менее чем за год до того, как в знаменитом 17-м томе журнала «Annalen der Physik» появились три работы Эйнштейна, в которых содержались теория относительности, теория броуновского движения и теория световых квантов **), рисует картину положения в теоретической физике накануне появления этих работ так, как ее видел один из самых проникательных теоретиков поколения, предшествовавшего Эйнштейну.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА В КОНЦЕ XIX ВЕКА

В то время, когда делался доклад, прошло уже четыре года с тех пор, как пионерскими работами М. Планка по теории излучения черного тела была начата революция в теоретической физике, открывшая тот новый период в ее истории, о котором говорил А. Пуанкаре в своем докладе. Основным результатом этого периода должно было стать создание атомной теории, действительно позволившей, в соответствии с излагаемой в начале доклада программой, описать все «многообразие окружающих нас явлений, весь мир красок и звуков», но, в отличие от программы, обсуждавшейся Пуанкаре, это было сделано не на основе механики Ньютона, а на основе новой, квантовой, механики.

Исторический процесс, однако, не подчиняется формальной логике; начало нового периода наступило раньше, чем кончился предыдущий.

*) Первые издания этих книг вышли в 1902, 1904, 1908 и 1913 гг. («Последние мысли» были опубликованы посмертно). Книги переведены на основные европейские языки, в том числе на русский ¹⁻⁴.

**) Русские переводы — в ⁶, т. I, стр. 7, и т. III, стр. 92 и 108.

В 1904 г. в центре внимания А. Пуанкаре и его современников продолжали находиться проблемы доквантовой эпохи *) — проблема эфира и проблема статистической интерпретации термодинамики. Именно их обсуждению посвящена основная часть доклада.

Хотя всякая периодизация в той или иной степени условна, работы Эйнштейна 1905 г. больше, чем какое-либо другое событие, знаменовали завершение того периода развития теоретической физики, который мы сейчас называем классическим. Что же происходило в конце этого периода, в то время, когда жил и работал Пуанкаре?

А. Пуанкаре (1854—1912) принадлежал к тому поколению физиков, что и Г. Герц (1857—1894), Д. Лармор (1857—1942), П. Н. Лебедев (1866—1912), Г. А. Лоренц (1853—1928), А. Майкельсон (1852—1931), М. Планк (1858—1947) и Дж. Дж. Томсон (1856—1940). Круг теоретических проблем, в котором работало это поколение, был в значительной степени определен работами К. Максвелла (1831—1879), создавшего теорию электромагнитного поля и заложившего, совместно с Л. Больцманом (1844—1906) и Д. Гиббсом (1839—1903), основы статистической физики; поэтому не случайно, что имя Максвелла неоднократно упоминается в докладе.

Теперь мы видим, что в то время, когда работал А. Пуанкаре, в теоретической физике происходило несколько, в значительной степени независимых, процессов. Происходил переход от классической термодинамики к статистической физике, в которой второе начало термодинамики — принцип необратимости энтропии — стал не абсолютным, а вероятностным утверждением. Статистическая природа второго начала была ясна уже Больцману и Гиббсу, но, как видно из доклада, такая точка зрения не была общепринятой в 1904 г. Происходил переход от ньютоновской механики систем материальных точек с конечным числом степеней свободы, дальностью действия и галилеевой инвариантностью к теории классического электромагнитного поля с бесконечным числом степеней свободы **, близкостепенностью и лоренц-инвариантностью. Наконец, работами М. Планка и А. Эйнштейна начал переход к новой, квантовой, механике. Все это, вместе с воздействием новых экспериментальных открытий (электрон, лучи Рентгена, радиоактивность), привело к революции в физике, начавшейся при жизни Пуанкаре.

Что касается первых двух переходов, то с современной точки зрения они уже не кажутся особенно революционными. Идеи статистической физики восходят по крайней мере ко времени Д. Бернулли и М. В. Ломоносова. Теория относительности А. Эйнштейна в некотором смысле содержалась уже в уравнениях Максвелла, да и сама структура классической теории поля очень близка к классической механике.

Для самого Пуанкаре это, конечно, было не так. С его точки зрения классическая физика была основана на механике Ньютона, а ее методом было причинное описание явлений дифференциальными уравнениями. Как отказ от ньютоновской механики (на самом деле уже содержащийся в уравнениях Максвелла), так и явное введение вероятностных представлений в статистическую механику с его точки зрения противоречили принципам классической физики и были явлениями кризиса. Так, например, обсуждение статистической интерпретации броуновского движения заканчивается выводом: «И вот мы видим, что один из наших принципов в опасности» (см. ⁵, стр. 668).

*) Работы М. Планка в докладе не упоминались.

***) Математический аппарат теории — уравнения в частных производных — появился уже в механике сплошных сред, но там он был методом феноменологического описания.

В 1904 г. было еще совсем неясно, что перед теоретической физикой стояло несколько разных и в значительной степени независимых проблем и что, например, проблема принципа относительности не была связана прямо с неклассическим характером атомных спектров. Характерно, что Пуанкаре выражал в докладе надежду, что создание динамики электронов, объясняющей необычные законы атомных спектров, позволит решить проблемы, связанные с перечисленными принципами (т. е. с принципом относительности, законами сохранения и вторым началом). Вообще вся картина выглядела для него совсем иначе, чем для нас, так как Пуанкаре считал, что теория Максвелла представляет собой феноменологическую теорию эфира, описываемого механикой Ньютона.

Именно с этим связано то, что Пуанкаре разделяет развитие классической физики на два периода: первый — атомных моделей, основанных на механике Ньютона, и второй — феноменологических теорий, также основанных на механике Ньютона, но не рассматривающих атомных моделей явно. К таким теориям Пуанкаре относил два основных достижения второй половины XIX века — классическую термодинамику и электродинамику Максвелла.

Надо, впрочем, заметить, что историю развития физики, излагаемую в начале доклада, не следует вообще, конечно, воспринимать буквально; это скорее спроецированная на прошлое ситуация начала века; если тогда наличие «кризиса физики» считалось общепризнанным, то вряд ли первый кризис, о котором говорил Пуанкаре, существовал как осознанное явление.

Ощущение кризиса физики в начале века было связано с тем, что в течение длительного времени верили в то, что ньютоновская механика центральных сил является окончательной и навсегда установленной основой физики. Развитие физики обнаруживало, что механика Ньютона имеет только ограниченную область применимости; таким образом, эта основа разрушалась, а с ней и иллюзия обладания окончательной теорией.

Изменение оказалось необратимым; хотя конкретные проблемы, стоявшие перед физикой, были успешно решены, теорий, которые могли бы претендовать на окончательный характер, уже не появилось.

Отношение Пуанкаре к надвигавшейся и уже начавшейся перестройке теоретической физики не было однозначно определенным. Если Эйнштейн в начале 900-х годов пришел к убеждению (см. ⁶, т. IV, стр. 277), что «ни механика, ни термодинамика не могут претендовать на полную точность, за исключением предельных случаев», то Пуанкаре, хотя он и видел, что перестройка основ физики может стать неизбежной, был далек от безоговорочного признания ее необходимости.

В докладе он настойчиво возвращается к обсуждению возможности «сохранить принципы» (см. ⁵, стр. 673, 676) и заканчивает его напоминанием: «отнюдь не доказано, что принципы не выйдут из сражения победоносными и неизменными».

Можно думать, что осторожность Пуанкаре была связана с тем, что интуиция физика говорила ему, что принципы, основанные на огромной совокупности фактов, не могут стать неприменимыми в новых областях опыта; это предчувствие в значительной степени оправдалось, но при этом принципы существенно изменили и форму, и содержание, отнюдь не оставшись неизменными *).

*) Пуанкаре обсуждал такую возможность и подчеркивал, что в случае ее реализации ранее установленные закономерности должны будут содержаться в новых как предельные случаи и, таким образом, сохраняют свое значение (см. ⁵, стр. 677).

Возможно, что именно желание сохранить неизменными основы физики было одной из причин, побуждавших Пуанкаре утверждать, что принципы являются в действительности соглашениями, которые вообще не могут быть опровергнуты опытом (см. ¹, стр. 182, и ⁵, стр. 676), хотя он не придерживался такой точки зрения последовательно *).

ПРОБЛЕМА БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Пуанкаре начинает обсуждение кризиса принципов с проблемы броуновского движения (см. ⁵, стр. 666), объяснение которого требовало привлечения статистических идей, выходящих за рамки классической термодинамики, основанной на двух законах: законе сохранения энергии и законе неубывания энтропии, или, по терминологии Пуанкаре, на принципе Майера и принципе Карно. Как известно, классическая термодинамика создавалась в тесном взаимодействии как с развивавшейся параллельно кинетической теорией газов, так и со старыми идеями теории теплорода, о которой Пуанкаре, упрощая картину, явно не упоминает. В окончательной форме термодинамика приняла вид феноменологической теории, основанной на первом и втором законах термодинамики и не рассматривавшей явно атомных моделей, в соответствии с описанием в докладе.

При этом осталось почти не замеченным противоречие между обратимостью уравнений механики и вторым началом термодинамики, обсуждаемое Пуанкаре. Это противоречие было ясно осознано только после дискуссии, последовавшей за работами Больцмана, в которых была дана статистическая интерпретация энтропии. В этой дискуссии наряду с простым аргументом обратимости, упоминаемым в докладе, важную роль сыграла открытая Пуанкаре возвратная теорема. В ходе дискуссии Больцманом была дана вероятностная интерпретация второго начала и найдена связь между вероятностью состояния и энтропией. Однако, как видно, например, из доклада А. Пуанкаре, точка зрения Больцмана, резюмированная им в докладе, прочитанном на том же конгрессе в Сент-Луисе (см. ⁷, стр. 163), где был сделан доклад Пуанкаре, не была общепризнанной. В частности, хотя флуктуационное объяснение броуновского движения, излагаемое в докладе Пуанкаре, было известно уже давно и обсуждалось рядом авторов, в том числе Рамзеем в 1876 г., и упомянутым в докладе Гюи в 1888 г. (см. ⁸, стр. 98—99), сам Пуанкаре не рассматривал его как установленное и считал проблему броуновского движения не решенной. Реально эта проблема заключалась в отсутствии количественной теории.

ПРОБЛЕМА ИНТЕРПРЕТАЦИИ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА

Статистическая интерпретация второго начала была найдена сравнительно быстро, хотя длительное время и не получала признания. Путь к раскрытию истинного содержания уравнений Максвелла оказался значительно более долгим и трудным. Последовательно построить электродинамику можно только на основе принципа относительности Эйнштейна, и смысл уравнений Максвелла стал полностью ясен только после создания теории относительности.

*) Обсуждение связи позиции Пуанкаре по этому вопросу с его взглядами на общие проблемы теории познания выходит за рамки этой статьи. Высказывания А. Пуанкаре по гносеологическим вопросам были подвергнуты критике В. И. Лениным в его труде «Материализм и эмпириокритицизм», где был дан анализ кризиса физики с позиций теории познания диалектического материализма. При анализе кризиса физики В. И. Ленин использовал содержание гл. 8 книги «Ценность науки». Заметим, что ее гл. 7—9 представляют собой текст публикуемого доклада, содержащий небольшие изменения.

Для этого нужно было пересмотреть основные представления классической физики о пространстве и времени и отказаться от представления о механике Ньютона как основе физики.

Поэтому кризис физики для Пуанкаре был связан прежде всего с необходимостью модификации принципов физики (по существу, принципов классической механики), которая была нужна для последовательной интерпретации уравнений Максвелла, а возникший здесь комплекс проблем оказался неотделимым от проблемы относительности.

Первоначально смысл и содержание теории Максвелла был совершенно неясен. Известный теоретик второй половины XIX века Тэт в написанном им в 1879 г. некрологе Максвелла писал, что ввиду совпадения скорости света, вычисленной из электромагнитных констант, с наблюдаемой «сейчас остается мало сомнений в том, что максвеллова теория электрических явлений покоится на столь же прочном основании, как и волновая теория света. Но создатель теории, работавший над ней в течение всей жизни, все же оставил ее еще в детском возрасте. Для того чтобы она достигла полного развития, потребуются, вероятно, усилия еще целого поколения математиков»⁹. Предсказания Тэта оказались, впрочем, слишком оптимистическими: потребовались усилия двух поколений — поколения Лоренца и поколения Эйнштейна *).

Как известно, электродинамика Максвелла была сформулирована им окончательно в 1864 г. и излагалась также в более позднем «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873). В уравнения Максвелла входили две пары полей \mathbf{E} , \mathbf{D} и \mathbf{B} , \mathbf{H} ; наряду с уравнениями для полей в нее на равных правах входило уравнение тока $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$. Система уравнений содержала также и потенциалы \mathbf{A} , ϕ , так что она имела более сложный вид, чем обычно используемая сейчас. Но-видимому, Максвелла не был склонен рассматривать ток как движение зарядов; такая интерпретация была для него связана с концепцией электрических жидкостей, которую его теория была призвана заменить **).

В течение длительного времени после появления теории Максвелла предпринимались, начатые самим Максвеллом, попытки объяснить его уравнения, исходя из механических моделей эфира, в возможности и необходимости чего вначале не сомневались. Пуанкаре считал, что теорию Максвелла следует рассматривать как феноменологическое описание эфира. Предполагалось, что она аналогична термодинамике, дающей феноменологическое описание систем атомов. Так же как и многие его современники, Пуанкаре предполагал, что уравнения Максвелла есть лагранжианы уравнения, описывающие в обобщенных координатах, роль которых играют заряды, токи и напряженности поля, механику эфира. При этом предполагалось, что эта механика ньютоновская. Основанием для этой точки зрения было существование в электродинамике принципа наименьшего действия, что для квазистационарного случая было известно уже Максвеллу. Действие для электромагнитного поля в пустоте было известно в 900-е годы; оно содержится, в частности, в книге Лармора (см. ¹³, стр. 82—104).

Исходя из того, что любая система, описываемая механикой Ньютона, удовлетворяет принципу наименьшего действия, Пуанкаре делал вывод, что раз принцип наименьшего действия для поля существует, то должна существовать и ньютоновская модель (см. ¹, стр. 236—244), по к

*) История начального периода развития теории электромагнитного поля после появления работ Максвелла обсуждалась в статьях ¹⁰, ¹¹.

**) Например, обсуждая проблему электролиза, Максвелл писал: «Чрезвычайно невероятно, однако, что, когда мы придем к пониманию истинной природы электролиза, мы сохраним в какой-либо форме теорию электронов» ¹².

задаче построения конкретной модели он относился, по-видимому, скептически.

Современная картина электромагнитного поля в пустоте была в основном создана Лоренцом, перешедшим от электродинамики Максвелла к электродинамике двух полей \mathbf{E} , \mathbf{H} , взаимодействующих с зарядами. Лоренц, однако, считал по-прежнему, что носителем поля является эфир. Интересно, что он рассматривал свою электродинамику как частичное возвращение к домаксвелловским представлениям, так как в ней снова в качестве одного из основных элементов появились точечные заряды *).

Формально теория Лоренца сводилась к уравнениям для полей и формуле для действующей на заряд силе $\mathbf{F} = e\mathbf{E} + (e/c)[\mathbf{v}, \mathbf{H}]$. Таким образом, электромагнитная часть уравнений Лоренца была тождественна современной; оставалось «только» найти релятивистское выражение для импульса электрона и выбросить эфир.

ПОИСКИ ЭФИРА

Ключом к решению этой задачи оказалась проблема абсолютного движения — движения относительно эфира. Для Максвелла реальность эфира не вызывала сомнений, а задача его прямого обнаружения на опыте была одной из основных задач физики. Из представлений, основанных на механике Ньютона, следовало, что существует прямой и непосредственный способ обнаружить эфир. Для этого надо было обнаружить изменение скорости распространения света относительно Земли, возникающее из-за движения Земли в эфире. Такого рода опыты Максвелл обсуждал в статье «Эфир», написанной им незадолго до смерти, и более подробно в письме к американскому астроному Тодду, опубликованном уже посмертно в 1879 г. **). В обеих публикациях обсуждалась возможность обнаружения движения Солнечной системы относительно эфира по наблюдениям над спутниками Юпитера. В рамках ньютоновской механики здесь возникал эффект порядка v/c , где v — скорость Солнечной системы относительно эфира. Максвелл отмечал также, что наземные методы измерения скорости света всегда требуют замкнутости траектории, что приводит к появлению эффекта движения Земли только в порядке $v^2/c^2 \sim 10^{-8}$, а это он считал уже ненаблюдаемым.

Однако уже в 1881 г. А. Майкельсон, работавший в то время в берлинской лаборатории Гельмгольца, делает попытку обнаружить обсуждавшийся Максвеллом квадратичный эффект интерферометрическим методом. Опыт дал отрицательный результат ***).

К тому времени, когда был поставлен опыт, проблема эфира в оптике имела уже длительную историю, начало которой относится к эпохе Гюйгенса. Из эффектов, непосредственно связанных, как предполагалось, с движением относительно эфира, были хорошо известны явления абберрации, доплер-эффект и явление так называемого частичного увлечения света движущейся средой ****). Напомним, что частичное увлечение описывается формулой Физо — Френеля

$$c'_1 = c_1 + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

*) В 1895 г. Лоренц писал: «В предположениях, которые я ввожу, содержится в известном смысле возврат к более старым представлениям. Сущность идей Максвелла этим не уничтожается, но нельзя отрицать, что ионы, вводимые мной, не очень отличаются от электрических частиц, употреблявшихся раньше». (14, стр. 8).

***) Статья «Эфир» в «Encyclopaedia Britannica» (см. 18, стр. 763); письмо Тодду было опубликовано в «Nature» 16.

****) Сведения об этом и последующих опытах Майкельсона см. в 17-19.

*****) Ранняя история оптики движущихся сред и проблемы эфира излагается в 20-22

где n — показатель преломления среды (скажем, воды), $c_1 = c/n$ — скорость света в покоящейся среде, v — скорость среды относительно эфира и c'_1 — скорость света относительно эфира.

С современной точки зрения под скоростью относительно эфира следует подразумевать просто скорость относительно лабораторной системы координат, а сама формула Френеля — Физо есть очевидное следствие релятивистского закона сложения скоростей. В тогдашней же ситуации эта формула с неизбежностью требовала введения эфира и, следовательно, отказа от равноправия всех инерциальных систем.

Лоренц впервые обратился к проблеме оптики движущихся сред в своей статье об оптике движущихся сред, вышедшей в 1886 г. *). В этой работе он, используя формулу Френеля — Физо, показал, что с точностью до членов порядка v/c в оптических явлениях эффекты движения среды не могут проявиться и, таким образом, с этой точностью движение относительно эфира необнаружимо **). Это объясняло отрицательный результат ряда ранних попыток обнаружить движение относительно эфира, но, конечно, не результат опыта Майкельсона, где искался эффект v^2/c^2 . При детальном анализе этого опыта Лоренц, однако, обнаружил, что Майкельсон зависил в два раза ожидаемый эффект, не учтя изменения времени распространения света в направлении, перпендикулярном к скорости установки относительно эфира. После исправления ошибки ожидаемый эффект сравнивался с погрешностью опыта, и проблема переставала быть серьезной.

Но уже в следующем 1887 г. Майкельсон вместе с Морли, повторив опыт в США, получил верхнюю границу для эффекта порядка $1/20 - 1/40$ от ожидаемого. Сам Майкельсон, так же как и в 1881 г., считал, что его результат доказывает справедливость существовавшей в то время теории Стокса, согласно которой эфир вблизи Земли полностью ею увлекался. Это объяснение оказалось неприемлемым: Лоренц обнаружил, что теория Стокса математически противоречива ***).

СОКРАЩЕНИЕ ЛОРЕНЦА — ФИТЦДЖЕРАЛЬДА

В 1892 г. Лоренц опубликовал небольшую статью ****), где он писал: «Загадка этого опыта [Майкельсона] беспокоила меня в течение долгого времени, и в конце концов я смог увидеть единственный способ согласовать его результат с теорией Френеля». Этот способ, изложенный Лоренцом в цитированной статье, заключался во введении гипотезы о сокращении движущегося относительно эфира тела. Это сокращение впоследствии получило название сокращения Лоренца — Фитцджеральда.

Уже в этой работе Лоренц замечает, что рассматриваемое им сокращение может быть получено как следствие его электродинамики. Используя ее, он сравнивает силы, действующие в системе зарядов B , движущейся относительно эфира со скоростью v , и силы в покоящейся относительно

*) Статья «О влиянии движения Земли на оптические явления»; электромагнитная теория света здесь еще не используется (см. ²³, стр. 153).

**) Доказательство относится к ситуациям, когда измеряются только пространственные пути лучей. Опыт, предлагавшийся Максвеллом в письме Тодду, не относится к этой категории. В нем, на современном языке, предполагается, что спутники Юпитера и часы наблюдателя на Земле играют роль часов, синхронизированных в «ньютоновском» времени и перемещающихся в пространстве.

***) К обсуждению возможности объяснения опыта Майкельсона на основе так или иначе модифицированной теории Стокса Лоренц возвращался неоднократно, вплоть до 1899 г. (см. ²³, стр. 224, 237, 245). Майкельсон пытался проверить теорию Стокса в независимом эксперименте в 1897 г.

****) Статья «Об относительном движении Земли и эфира» (см. ²³, стр. 219).

эфира системе S , продольные размеры которой увеличены в $1 + (v^2/2c^2)$ раз. Тогда продольные компоненты сил в B и C равны, а поперечные компоненты в B в $1 - (v^2/2c^2)$ меньше, чем в C .

Если предположить, что по такому же закону преобразуются и молекулярные силы и что в неподвижном теле силы были уравновешены, то они будут уравновешены и в движущемся теле после того, как произойдет продольное сокращение. Таким образом, сокращение, введенное Лоренцом и ранее обсуждавшееся Фитцджеральдом *), получало динамическое объяснение **). По существу, уже в этой работе содержалась основная идея, доведенная до конца в работах Лоренца 1904 г. и Пуанкаре 1905 г.: невозможность обнаружения движения относительно эфира выводилась как следствие компенсационных динамических эффектов, вытекающих из уравнений электродинамики Лоренца.

В работе Лоренца 1892 г. был рассмотрен только статический случай. Обобщение на случай наличия внутренних молекулярных движений требовало использования релятивистской механики и вызывало большие трудности. Ряд важных шагов к решению этой задачи, сделанных Лоренцом в 90-е годы, был суммирован им в его широко известной в то время книге «Попытка построения электродинамики движущихся сред» (см. ¹⁴, стр. 1). В этой книге Лоренц, анализируя соответствия между движениями в движущейся и покоящейся относительно эфира системах, использует местное время t' в «нерелятивистском» виде ***)

$$t' = t - \frac{v}{c^2}(x - vt)$$

и применяет его для доказательства того, что в его электродинамике движение относительно эфира необнаружимо в порядке v/c ****). Здесь же Лоренц показывает, что в его электродинамике справедлива формула Физо — Френеля. Все это не объясняло опыта Майкельсона, и его обсуждение, содержавшееся в этой книге, по существу совпадает с содержанием его работы 1892 г.

ПОЗИЦИЯ ПУАНКАРЕ В 1895—1900 гг.

А. Пуанкаре заинтересовался проблемой электродинамики движущихся сред позже Лоренца. В 1895 г. им была опубликована серия статей по электродинамике движущихся сред, носившая в основном обзорный характер *****).

В третьей статье Пуанкаре суммирует условия, которым, по его мнению, должна была удовлетворять электродинамика движущихся сред:

1) «Теория должна объяснять опыт Физо, т. е. то, что свет (или, что то же, поперечные электромагнитные волны) увлекается движущимися средами только частично».

*) Гипотеза Фитцджеральда была опубликована в журнале «Science» в 1889 г. Лоренц узнал о соображениях Фитцджеральда, по-видимому, в 1894 г. из статьи Лоджа (см. ¹⁸, стр. 179—182).

**) Логика рассуждений Лоренца и сейчас часто остается непонятной. Так, например, в статье ²⁴ утверждается (стр. 263), что Лоренц никогда не производил расчета, объясняющего сокращение.

***) Здесь, как и всегда, Лоренц рассматривал два процесса: один, происходящий в покоящейся, и другой — в движущейся системах частиц. Время t есть момент события, происходящего в движущейся системе частиц (тел), t' — время соответствующего события в покоящейся системе. В обоих случаях времена t' и t измерятся в универсальном «ньютоновском» времени.

****) Большого в то время Лоренц не мог сделать принципиально, так как он пользовался ньютоновским выражением для импульса электрона.

*****) Статьи были опубликованы в журнале «L'Éclairage Électrique», перепечатаны в собрании трудов Пуанкаре (²⁵, стр. 369—426); см. также обсуждение в статье ²⁶.

2) «Теория должна согласовываться с законом сохранения электричества и магнетизма».

3) «Теория должна согласовываться с принципом равенства действия и противодействия».

Поясним, что под 2) понимаются сохранение заряда и условие $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$, а в 3) имеется в виду требование сохранения импульса для «весомой материи», или, говоря теперешним языком, для частиц: Пуанкаре считал, что эфир не должен уносить импульс.

В конце статьи Пуанкаре отмечает неудачу экспериментов по обнаружению движения относительно эфира и, ссылаясь на опыт Майкельсона, выражает убеждение в том, что такое движение является необнаружимым принципиально.

Блестящая догадка Пуанкаре казалась несовместимой с представлением об эфире, но одной из основных черт электродинамики Лоренца было несохранение импульса для «весомой материи» — вещества, а это, как тогда представлялось, означало, что импульс должен передаваться эфиру.

Поэтому не случайно, что Пуанкаре думал, что в будущей теории импульс весомой материи будет сохраняться (требование 3) и что по аналогии с механикой в теории, где абсолютное движение необнаружимо, должно выполняться и условие 3) — равенство действия и противодействия для «весомой материи».

Несмотря на то, что электродинамика Лоренца не удовлетворяла эту требование, Пуанкаре все же считал ее «наименее неудовлетворительной» по сравнению с другими теориями и выражал надежду на то, что дальнейшее развитие теории устранит ее недостатки — отсутствие доказательства невозможности обнаружения движения относительно эфира во всех порядках по v/c и несохранение импульса для частиц. При этом он предполагал, что эти дефекты связаны и устранятся одновременно.

В 1900 г. Пуанкаре сделал доклад на международном съезде физиков в Париже, вошедший в книгу «Наука и гипотеза» в виде гл. 9, 10. Здесь Пуанкаре опять говорил (см. ²³, стр. 186—189) о двух недостатках электродинамики Лоренца — невыполнении закона сохранения импульса и отсутствии последовательного объяснения неудач попыток обнаружить движение относительно эфира, и снова высказал предположение, что такое движение принципиально ненаблюдаемо.

В докладе Пуанкаре имеются высказывания, которые могут быть интерпретированы как сомнения в существовании эфира, но эти сомнения всегда были одновременно и сомнениями в электродинамике Лоренца. В этой электродинамике, где электромагнитное излучение могло уносить импульс, эфир казался ему необходимым.

В этой же книге Пуанкаре в гл. 6 подчеркивал, что одновременность событий, происходящих в разных точках пространства, нуждается в определении и не является однозначно очевидной *).

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В ДОКЛАДЕ ПУАНКАРЕ И ЗАВЕРШАЮЩИЕ РАБОТЫ ЛОРЕНЦА И ПУАНКАРЕ

Обсуждение проблемы принципа относительности в рассматриваемом докладе Пуанкаре 1904 г. основано преимущественно на двух работах — статье Пуанкаре 1900 г. (см. ²⁵, стр. 464) и знаменитой статье Лоренца 1904 г. **).

*) См. ¹, стр. 103. Еще ранее Пуанкаре обсуждал этот вопрос в статье ²⁷.

***) Статья «Электромагнитные явления в системе, движущейся со скоростью, меньшей скорости света». Русский перевод — в ²⁶, стр. 28, и ²⁹, стр. 16.

Статья Пуанкаре 1900 г. посвящена детальному анализу проблемы законов сохранения в электродинамике Лоренца и Герца *). В этой статье показано, в частности, что импульс в электродинамике Лоренца будет сохраняться, если приписать эфиру плотность импульса, равную в современных обозначениях $(1/4\pi c)$ $[\mathbf{E}, \mathbf{H}]$. Пуанкаре, следуя своим общим концепциям, отождествляет в докладе этот импульс с импульсом «атомов эфира». Именно с этой интерпретацией связано утверждение (см. ⁵, стр. 671) о неудовлетворительности предположений, которые нужно делать относительно движений в эфире. Действительно, при удвоении зарядов в излучателе уносимый импульс учетверяется, а следовательно, должна была учетвериться и скорость атомов эфира. Пуанкаре, вероятно, исходя из того, что силы всегда должны быть пропорциональны заряду, считал, что естественным было бы удвоение скорости.

В этой же статье содержится обсуждаемая в докладе интерпретация местного времени Лоренца $t' = t - (v/c)(x - vt)$ как времени, возникающего при синхронизации светом в движущейся системе отсчета. Пуанкаре, однако, считает, что движущийся относительно эфира наблюдатель не замечает своего движения именно (и как раз) потому, что он использует время, отличное от истинного времени (см. ⁵, стр. 671).

В работе Лоренца 1904 г. был сделан решающий шаг к доказательству совместимости его электродинамики с невозможностью обнаружить движение относительно эфира. Для понимания этих работ и последовавших за ними в 1905 г. работ Пуанкаре, доведшего доказательство до конца, существенно помнить, что в них, так же как и в предшествующих статьях Лоренца, не используются координаты и время, измеряемые часами и масштабами в движущейся системе отсчета. Как мы видели, вопрос о времени, измеряемом в движущейся системе отсчета, обсуждался Пуанкаре, тем не менее в работах 1905 г. он следует за рассуждениями Лоренца и эту интерпретацию не обсуждает.

В работе Лоренца 1904 г. используются преобразования для времени и координат, впоследствии названные преобразованиями Лоренца **), и соответствующие преобразования для электромагнитных полей. Но здесь, так же как и во всех предшествующих работах Лоренца, начиная с 1892 г., штрихованные и нештрихованные переменные $(x', y', z', t', \mathbf{E}', \mathbf{H}'$ и т. д. и $x, y, z, t, \mathbf{E}, \mathbf{H}$ и т. д.), связываемые этими преобразованиями, описывают две разные системы тел Σ' и Σ в одной и той же, покоящейся относительно эфира, системе координат. Система тел Σ' покоится, а система Σ движется относительно эфира. Преобразования Лоренца переводят некоторое возможное решение уравнений Максвелла — Лоренца, описывающее движущуюся систему Σ , в другое решение, описывающее покоящуюся систему Σ' . При рассматриваемом отображении не меняются внутренние соотношения в системе тел. Так, если \mathbf{E}', \mathbf{H}' равны нулю в точке x', y', z', t' , то \mathbf{E}, \mathbf{H} исчезают в точке x, y, z, t ***). Это объясняло, например, отсутствие сдвига полос в интерферометре Майкельсона и невозможность обнаружения движения относительно эфира.

*) Электродинамика Герца удовлетворяла галилеевой инвариантности. В интерпретации Пуанкаре в ней сохранялся импульс для «всего вещества». При этом теория не допускала предельного перехода к пустому пространству и приводила к полному увлечению света движущейся средой (см. также ²⁰, стр. 104—132).

***) Близкая форма преобразований использовалась Лоренцом в 1899 г. (см. ¹⁴, стр. 139). Правильная форма преобразований была найдена Лармором в 1900 г. (см. ¹³, стр. 173). Очень близкие по форме преобразования использовал Фойгт ²⁰.

***) Реальные обозначения и рассуждения Лоренца более сложны. В частности, он использует штрихованные величины и как вспомогательные переменные при описании системы Σ (не придавая им физического значения), а при описании Σ' переходит иногда к нештрихованным величинам, численно равным штрихованным.

Фактически Лоренц делал преобразования в два этапа. Сначала он рассматривал решение, соответствующее системе Σ , движущейся относительно эфира. Затем, используя по традиции преобразования Галилея, переходил к движущимся вместе с Σ осям координат. В новых координатах уравнения меняли вид; после этого Лоренц разыскивал подстановки, приводящие их к прежнему виду. Вводимые при этом величины E' и H' , рассматриваемые как функции x', y', z', t' , снова становились решением уравнений Максвелла — Лоренца. С точки зрения Лоренца это решение описывало систему Σ' , покоящуюся относительно эфира.

Сам по себе использованный Лоренцом метод рассуждения вполне возможен. Надо только учесть, что с современной точки зрения рассуждение ведется в некоторой, произвольно выбранной, инерциальной системе отсчета. После этого нужно было бы еще проанализировать, к чему приведут измерения, проводимые в движущейся вместе с телом Σ системе отсчета. Тогда стало бы ясно, что именно в силу сохранения внутренних соотношений штрихованные переменные одновременно есть координаты, времена и поля, измеряемые в движущейся системе отсчета*), а эффекты сокращения масштабов и замедления времени**), содержащиеся в преобразованиях, являющиеся относительными, а не абсолютными.

Однако ни Лоренц, ни Пуанкаре в последующих работах не сделали этого шага — для них вытекающее из преобразований Лоренца сокращение было абсолютным эффектом. Говоря словами доклада, «одни из диаметров Земли в результате движения планеты должен сократиться на $1/200\,000\,000$ часть» в направлении движения.

Построение Лоренца вместе с гипотезой о том, что любые силы и массы преобразуются по такому же закону, как и электромагнитные***), в принципе было полным — оно объясняло невозможность обнаружения движения относительно эфира. Фактически Лоренц в 1904 г. не дал полного доказательства — он не смог найти правильных преобразований для тока и заряда.

Последнее обстоятельство вместе с тем, что метод Лоренца не выявлял с самого начала универсальности релятивистских соотношений, привело, в частности, к тому, что Лоренц при анализе опыта Трутона, в котором искался эффект абсолютного движения, не сделал вывода о том, что эффект должен теоретически отсутствовать, а ограничился демонстрацией того, что его обнаружение не было возможно при реальной точности опыта****).

*) Чтение доклада Пуанкаре (см. ⁵, стр. 672) производит впечатление, что такая интерпретация была ему известна. Однако в действительности речь идет о неразвитой последовательно догадке. Это видно из того, что даже в 1908 г. Пуанкаре, излагая вопрос об инвариантности скорости света, сделал ряд ошибочных утверждений (см. ²⁵, стр. 575). Важность преобразований Лоренца обсуждалась Пуанкаре в книге ⁴ (стр. 30), но уже после появления работы Эйнштейна.

**) Как подчеркивалось в статье ³¹, ни Лоренц, ни Пуанкаре никогда не обсуждали замедления времени, содержащегося в преобразованиях Лоренца. На частном примере вопрос обсуждал Лармор (см. ¹³, стр. 174). Полный анализ содержания преобразований был дан только Эйнштейном. В статье ⁶ (стр. 19) обсуждено явление, называемое сейчас «парадоксом близнецов».

***) Одним из важнейших достижений работы Лоренца было то, что он, введя (без обоснования) гипотезу релятивистского сжатия для электрона и считая, что его масса чисто электромагнитная, получил выражение для импульса и массы с правильными трансформационными свойствами.

****) Трутон пытался обнаружить толчок, связанный с исчезновением импульса электромагнитного поля при разрядке движущегося относительно эфира конденсатора. Для объяснения отрицательного результата нужно было либо знать универсальность связи $E = mc^2$, либо исходить из того, что раз инвариантность уравнения доказана, то эффекта быть не может.

РАБОТЫ ПУАНКАРЕ 1905 г.

Пробелы в работе Лоренца были восполнены Пуанкаре в двух работах *). Первая из них, появившаяся 5 июня 1905 г., содержит краткое перечисление результатов, вторая — их подробное изложение. Уже в первой работе приведены преобразования Лоренца для координат и времени в форме, практически совпадающей с современной. Приведены также правильные преобразования для полей, плотности заряда и тока и силы Лоренца. Используя эти преобразования, Пуанкаре получил, что преобразования Лоренца образуют группу, относительно которой уравнения электродинамики Лоренца инвариантны. Отсюда он сделал вывод, что в соответствии с идеей Лоренца решение, описывающее движущуюся систему тел, является «деформированным» отображением решения, описывающего неподвижную систему; при этом отображении не меняются внутренние соотношения в системе.

Таким образом, принцип относительности — невозможность обнаружить движение относительно эфира — оказался выполненным при условии, что все силы преобразуются по тому же закону, что и электромагнитные **). Говоря словами Пуанкаре, объяснились «как невозможность обнаружить абсолютное движение, так и сокращение всех тел в направлении движения Земли» (см. ²⁵, стр. 491 ***)).

Программа Лоренца — Пуанкаре (получение группы Лоренца как группы инвариантности уравнений динамики электрона), конечно, не могла быть проведена до конца; для этого нужно было бы знать структуру электрона, не известную полностью и сейчас. Рассматривая динамику электрона, Пуанкаре был вынужден вводить дополнительные искусственные гипотезы, так как проблема структуры электрона с неизбежностью возникала у Лоренца и Пуанкаре при рассмотрении уравнений движения электрона и вычислении электромагнитной массы.

Пуанкаре, как мы видим, продолжал рассматривать сокращение Лоренца — Фитцджеральда как абсолютный эффект, а выполнение принципа относительности — как результат компенсаций. В такой постановке вопроса требование универсальной лоренц-инвариантности представлялось искусственным. В результате ситуация казалась ему малоудовлетворительной, и в своей завершающей работе (см. ²⁹, стр. 55—56) он писал:

«Представим себе астронома, живущего до Коперника и размышляющего над системой Итоломея; он заметил бы, что для всех планет один из двух кругов, эпицикл или деферент — основной круг, проходит в одно и то же время. Так как это не может быть случайностью, то, следовательно, между всеми планетами существует какая-то таинственная связь.

Однако Коперник, изменив лишь оси координат, рассматриваемые ранее как неподвижные, сразу уничтожил эту видимую связь; каждая планета описывает только один круг, и периоды обращения становятся независимыми друг от друга (до тех пор, пока Кеплер не установил между ними связь, которую считали уничтоженной).

Возможно, что и в нашем случае имеется нечто аналогичное; если бы мы приняли принцип относительности, то в законе тяготения и в электромагнитных законах мы нашли бы общую постоянную — скорость света. Точно, так же мы встретили бы ее во всех силах, какого угодно происхож-

*) Первая из них ³² появилась в «Comptus Rendus» от 5 июня 1905 г. Вторая была направлена 23 июля 1905 г. в журнал «Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo» ³¹. Статьи перепечатаны в ²⁵ (стр. 489 и 494) (переводы — в ²⁹, ³⁴).

***) В связи с этим Пуанкаре сделал попытку записать в лоренц-инвариантной форме закон тяготения, введя запаздывающие потенциалы (см. ²⁹, стр. 113—129).

****) Перевод в сборнике ³¹ неправильно передает смысл фразы.

дения, что можно объяснить только с двух точек зрения: или все, что существует в мире, — электромагнитного происхождения, или же это свойство, являющееся, так сказать, общим для всех физических явлений, есть не что иное, как внешняя видимость, что-то связанное с методами наших измерений. Как же мы производим наши измерения? Прежде мы ответили бы: перенося тела, рассматриваемые как твердые и неизменные, одно на место другого; но, в современной теории, принимая во внимание сокращение Лоренца, это уже не верно. Согласно этой теории двумя равными отрезками, по определению, будут такие два отрезка, которые свет проходит в одно и то же время.

Может быть, достаточно только отказаться от этого определения, чтобы вся теория Лоренца была совершенно уничтожена, как это случилось с системой Птолемея после вмешательства Коперника. Во всяком случае, если последнее и произойдет, то это еще не докажет, что усилия Лоренца были бесполезными, ибо и Птоломей, какого бы мнения о нем не придерживались, отнюдь не был бесполезен для Коперника».

ТРИ СТАТЬИ ЭЙНШТЕЙНА

Там, где А. Пуанкаре сомневался и колебался, молодой А. Эйнштейн пошел вперед, находя новые и неожиданные решения.

30 июня 1905 г. в редакцию «Annalen der Physik» поступила статья «К электродинамике движущихся тел». Появление этой работы было тем коперниковским переворотом, о возможности которого писал Пуанкаре *).

В основе работы Эйнштейна лежал анализ физического содержания понятий времени и координаты события, измеряемых в произвольной инерциальной системе отсчета **).

Эйнштейн сделал вывод, перед которым Лоренц и Пуанкаре остановились: из невозможности обнаружить абсолютное движение следует полное равноправие всех инерциальных систем, не существует привилегированной системы отсчета, связанной с эфиром, само понятие эфира излишне. Для того чтобы сделать этот вывод, нужно было ввести электромагнитное поле в пустоте как новый вид физического объекта — это означало резкий разрыв с господствовавшими представлениями, в том числе со взглядами Лоренца и Пуанкаре.

Равноправие всех инерциальных систем означало равноправие пространственно-временных координат, измеряемых в любой инерциальной системе отсчета. В работе Эйнштейна было дано последовательное описание методов измерения времени и координат в произвольной инерциальной системе и впервые явно поставлен и разрешен вопрос, как связаны пространственно-временные координаты в двух системах отсчета, если время

*) Впоследствии неоднократно сравнивали теорию относительности Эйнштейна, содержащуюся в этой работе, и теорию Коперника. Сам Пуанкаре никогда не высказывал своего отношения к теории Эйнштейна. Согласно ³⁵ (стр. 43) Пуанкаре теорию относительности не признавал. Тем не менее в посмертно опубликованной книге Пуанкаре ⁴ (стр. 21 и далее) проблема принципа относительности излагается, как нам кажется, уже с учетом работы Эйнштейна (эфир не упоминается, обсуждается относительный характер эффектов), но Пуанкаре пользуется термином «принцип относительности Лоренца», подразумевая теперь под ним постулат инвариантности законов физики относительно преобразований Лоренца. Обсуждение вопроса о том, почему Пуанкаре не высказал в печати (в отличие от Лоренца) своего отношения к работе Эйнштейна и в какой степени Эйнштейн был знаком с работами Лоренца и Пуанкаре в то время, когда он работал над своей статьей, выходит за рамки этой статьи. Фактические сведения бедны. Достоверно известно, что Эйнштейн знал книгу Лоренца 1895 г. и «Науку и гипотезу» Пуанкаре. Статья Пуанкаре 1908 г., по-видимому, написана без знания работы Эйнштейна (см. выше, стр. 689).

***) Сам термин в статье Эйнштейна еще отсутствовал.

определяется часами, синхронизованными светом, и координаты изменяются стандартными масштабами *). Эта связь была найдена Эйнштейном, исходя из двух постулатов — принципа относительности и постулата независимости скорости света от движения источника **). Только после того, как это было сделано, Эйнштейн смог утверждать, что законы электродинамики и оптики имеют одинаковый вид во всех системах отсчета, и показать, что постулат относительности, понимаемый как требование одинаковой формы законов природы во всех инерциальных системах, может действительно выполняться.

При этом требование инвариантности уравнений физики относительно релятивистских преобразований пространственно-временных координат, называемых сейчас преобразованиями Лоренца, стало очевидным следствием и выражением равноправия всех инерциальных систем.

Революционным результатом работы Эйнштейна был вывод о том, что такие величины, как длина и время, и понятие одновременности относительны — зависят от системы отсчета. После того, как этот вывод был сделан, стало ясно, что сокращение Лоренца — Фитцджеральда это не «реальное» сжатие тела, вызванное движением через эфир, как считали Пуанкаре и Лоренц, а проявление относительности длины, и невозможность обнаружить абсолютное движение связана не с компенсацией различных эффектов, обусловленных с движением через эфир, а с относительностью длины, времени и одновременности ***).

Таким образом, Эйнштейном была создана теория относительности, как физическая теория пространства-времени, основанная на представлении об относительном характере релятивистских эффектов замедления времени и сокращения длины, и проблема принципа относительности была разрешена ****).

*) В рамках представлений об эфире связь местного времени Лоренца (v/c -приближении) и синхронизации светом была найдена Пуанкаре, но идея не была развита. В опубликованных работах Пуанкаре и Лоренца полностью отсутствовал анализ измерения координат, что, как изложено выше, заставило придать другой смысл переменным x', y', z', t' (см. выше стр. 688) и не дало возможности установить равноправие всех инерциальных систем.

***) Формулы, найденные Эйнштейном, математически тождественны с формулами Лоренца, но у Лоренца и Пуанкаре они имели другое физическое содержание.

****) См., например, описание различия между точкой зрения Лоренца и принципом относительности Эйнштейна, данное Лоренцом (28, стр. 133—134).

*****) Иногда высказывается мнение, что создателями теории относительности следует считать Лоренца и Пуанкаре (см. 21, т. II, стр. 40, и русский перевод в 34, где имеются также перефразировки некоторых использованных нами источников) или Лармора, Лоренца, Пуанкаре, Эйнштейна (см. 34, стр. 303). Авторы, придерживающиеся этого мнения, не замечают основной идеи работ Лоренца, Лармора и Пуанкаре — сравнения движущегося и неподвижного относительно эфира тел в системе отсчета эфира. Это, возможно, обусловлено тем, что эти работы нелегко понять, что приводит к их ошибочной интерпретации. Так, Э. Уиттекер фактически излагает содержание работы Эйнштейна, считая, что он излагает «теорию относительности Лоренца и Пуанкаре», а А. А. Тяпкин, например, счел ошибкой ключевое место работы Лоренца 1904 г. — переход к построению системы Σ' (см. 34, стр. 287 и др.).

Сама по себе постановка вопроса о том, кого следует «считать создателем теории», бессодержательна, так как наука создается трудом многих людей. Хорошо известно, что в работах Лоренца, Лармора, Пуанкаре и других содержались многие идеи и результаты, легшие в основу теории относительности. Названия всегда содержат нечто условное, но, говоря о теории относительности Эйнштейна, физики отдадут должное значению сделанного им шага — именно он понял, что выполнение принципа относительности связано с относительностью времени и длины. Это было переломным моментом длительного развития теории и эксперимента и тем «теоретико-познавательным подвигом Эйнштейна, ставящим его имя наравне с именем Коперника», о котором писал Герман Вейль, автор одной из лучших книг по теории относительности (см. 36, стр. 164).

Работа Эйнштейна занимает особое место в современной физике. В ней впервые был применен тот метод использования принципов инвариантности, который сейчас является общепринятым. В отличие от работ Лоренца и Пуанкаре, в ней не ставилась задача вывести существование рассматриваемой инвариантности из известных и заданных уравнений. Эйнштейн рассматривал принцип относительности как основанный на опыте исходный постулат теории. Преобразования группы, соответствующей данной инвариантности, определялись из минимального набора постулатов, а требование инвариантности относительно них использовалось для установления связей между физическими величинами. Это дало возможность обойти трудные динамические проблемы структуры частиц; оказалось, что основные закономерности связаны не с деталями динамики, а с общими свойствами группы Лоренца. Метод оказался очень плодотворным.

В частности, запутанный вопрос о связи между массой и энергией был быстро разрешен Эйнштейном. Полученное им вскоре соотношение $E = mc^2$ привело его к выводу о возможности существования дефектов масс для радиоактивных веществ.

Другая проблема, обсуждавшаяся в докладе Пуанкаре, была решена в работе Эйнштейна по теории броуновского движения, где содержалась количественная теория броуновского движения, доступная прямой экспериментальной проверке. Эта работа и аналогичные работы Смолуховского в физическом аспекте завершили создание статистической физики, открыв путь к прямому экспериментальному доказательству вероятностной природы второго начала термодинамики. Прямая проверка теории была вскоре осуществлена Перреном.

Таким образом, кризис в том содержании, которое вкладывал в него Пуанкаре, был преодолен очень быстро: место классической механики заняла релятивизированная электродинамика Максвелла — Лоренца, а место термодинамики — статистическая физика.

После того, как это произошло и основы классической физики проявились и упростились, физика стала лицом к лицу с необходимостью гораздо более глубокой перестройки. Удивительная проницательность Пуанкаре не изменила ему и здесь — исследование спектральных законов действительно сузило «наибольшие сюрпризы».

В том же 1905 г. в работе Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» был сделан следующий за работой Планка шаг в «третий период» математической физики, в котором законы природы действительно приобрели характер статистических законов. Прошло, однако, еще 20 лет, прежде чем была создана последовательная теория, объясняющая неклассические черты спектров излучения, о которых говорил А. Пуанкаре.

Если по своему содержанию работы Эйнштейна по частной теории относительности и его более поздние работы по общей теории относительности принадлежали к классической физике в нашем теперешнем ее понимании, то по своему духу и стилю именно они начинали новый период ее истории.

Работы Эйнштейна показали, что в новых областях явлений наглядные представления, казавшиеся непосредственно очевидными, становятся неприменимыми; одновременно было продемонстрировано, что использование математических теорий, казавшихся абстрактными и далекими от физики, дает возможность описать новые и необычные закономерности. Революционизировав мышление физиков, теория относительности подготовила еще более далеко идущий отказ от непосредственно очевидного, потребовавшийся для создания квантовой механики.

В заключение я хотел бы поблагодарить В. Б. Берестецкого, В. Н. Грибова и Л. Б. Окуня за многочисленные стимулирующие обсуждения, Я. А. Смородинского за ряд интересных сообщений и указание работы¹⁸ и В. П. Мурат за помощь в работе над текстом перевода доклада А. Пуанкаре⁵.

Институт теоретической и экспериментальной физики,
Москва

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. Пуанкаре, Наука и гипотеза, М., Т-во тип. А. И. Мамонтова, 1904.
2. А. Пуанкаре, Ценность науки, М., «Творческая мысль», 1906.
3. А. Пуанкаре, Наука и метод, СПб, Изд. П. П. Карбасникова, 1910.
4. А. Пуанкаре, Последние мысли, Пг., «Научное книгоиздательство», 1923.
5. А. Пуанкаре, УФН 113, 663 (1974) (см. этот же номер журнала).
6. А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. I—IV, М., «Наука», 1965—1967.
7. А. Больцман, Статьи и речи, М., «Наука», 1970.
8. Ж. Перрен, Атомы, М., ГИЗ, 1924.
9. Р. Г. Трайт, Nature 21, 317 (1879).
10. А. Борк, УФН 94, 167 (1968).
11. И. С. Шапиро, УФН 108, 319 (1972).
12. J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd. ed., v. 1, Oxford, 1904, p. 381.
13. J. J. Larmor, Aether and Matter, Cambridge, Univ. Press, 1900.
14. H. A. Lorentz, Collected Papers, v. 5, The Hague, Nijhoff, 1937.
15. J. C. Maxwell, The Scientific Papers, v. 2. P., Hermann, 1927 (photographic reprint).
16. J. C. Maxwell, Nature 21, 314 (1879).
17. С. И. Вавилов, Экспериментальные основания теории относительности, М.—Л., ГИЗ, 1928.
18. G. Holton, Isis 60, 153 (1969).
19. Творцы физической оптики, М., «Наука», 1973.
20. Л. И. Мандельштам, Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике, М., «Наука», 1972.
21. E. T. Whittaker, A History of the Theories of Aether and Electricity, v. I—II, N.Y., Harper, 1960.
22. У. И. Франкфурт, А. М. Френк, Оптика движущихся тел, М., «Наука», 1972.
23. H. A. Lorentz, Collected Papers, v. 4, The Hague, Nijhoff, 1937.
24. С. Голдбергер, УФН 102, 261 (1970).
25. H. Poincaré, Oeuvres, v. 9, P., Gauthier-Villard, 1954.
26. S. Goldberg, Am. J. Phys. 35, 934 (1968).
27. H. Poincaré, Rev. de Metaphys. et de Morale 6, 1 (1898).
28. Г. А. Лоренц, Старые и новые проблемы физики, М., «Наука», 1970.
29. Принципы относительности. Сборник работ классиков релятивизма (Г. А. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, Г. Минковский), М.—Л., ОНТИ, 1935.
30. W. F. S. Gött. Nachr., 41 (1887).
31. W. Rindler, Am. J. Phys. 38, 1111 (1970).
32. A. Poincaré, C.R. Ac. Sci. 140, 1504 (1905).
33. A. Poincaré, Rend. Circ. Math. Palermo 21, 129 (1906).
34. Принципы относительности, М., Атомиздат, 1973.
35. Helle Zeit—dunkle Zeit. In Memoriam Albert Einstein, Hrsg. C. Seelig, Zürich, «Europa», 1956.
36. H. Weil, Raum, Zeit, Materie, B., Springer-Verlag, 1923.