

**ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ:
СТАНОВЛЕНИЕ КОММУНИКАТИВНОЙ
РАЦИОНАЛЬНОСТИ***

Р.М. Нугаев

Как хорошо известно, эйнштейновская специальная теория относительности (СТО) и лоренцевская “эфирная” теория сосуществовали в начале XX в. как эмпирически эквивалентные [1]. Вплоть до настоящего времени в литературе предлагались различные описания перехода “Лоренц – Эйнштейн”, обосновывающие значение тех или иных факторов в качестве решающих для принятия СТО, – начиная со знаменитого эксперимента Майкельсона – Морли (рассматривавшегося в качестве “критического” эксперимента для опровержения теории эфира) и кончая всевозможными социокультурными, иногда достаточно экзотическими, обстоятельствами [2]. На наш взгляд, подавляющее большинство рассмотренных в литературе факторов действительно играло важные роли в процессе принятия СТО, и цель данной статьи не состоит в выдвигании еще одной “единственно правильной точки зрения”, отмечающей все предыдущие варианты как “недостаточно обоснованные”. Она гораздо скромнее и заключается в том, чтобы показать, что наряду со многими другими существовала важная группа факторов, которые также необходимо принимать во внимание, для того чтобы объяснить, почему по крайней мере *некоторая* часть специалистов-физиков начала XX в. перешла в лагерь сторонников релятивизма. Эта группа факторов может быть описана термином “*интертеоретический контекст*” принятия СТО.

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 98–06–80454.

Мы также полагаем, что учет факторов этой группы позволит достаточно просто объяснить некоторые историко-научные факты, которые, на наш взгляд, не получили пока достаточно убедительного объяснения. Речь идет прежде всего о том хорошо известном обстоятельстве, что релятивистская и квантовая революции происходили практически в одно и то же время. В рамках развиваемого в данной статье подхода это может быть объяснено тем, что они имели общую причину, которая заключалась в столкновении трех ведущих парадигм классической физики второй половины XIX в. – статистической механики, термодинамики и максвелловской электродинамики. Это столкновение привело, с одной стороны, к описанному еще лордом Кельвином “кризису” в физике конца XIX в. (доктрина Максвелла – Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы, проблема эфира) и, с другой стороны, к попыткам его разрешить, состоявшим в построении СТО и так называемой “ранней квантовой теории”.

Связь релятивистской и квантовой революций выразилась в том, что, во-первых, в обеих самое активное участие принимал один и тот же человек – Альберт Эйнштейн, а во-вторых, основополагающие работы в каждой из областей были опубликованы им в одном и том же, 1905-м году, в одном и том же журнале – “Annalen der Physik” с интервалом в два месяца. При этом статья по квантам света была опубликована раньше статьи по СТО. Последняя, как это будет показано в данной работе, является лишь частью квантовой программы. Поэтому ни генезис СТО, ни причины принятия этой теории научным сообществом не могут быть объяснены вне истории квантовой теории.

Соответственно в первом разделе статьи рассматривается генезис СТО, во втором – некоторые причины принятия этой теории научным сообществом, а третий посвящен истории создания и принятия ранней квантовой теории.

1. Генезис специальной теории относительности

Для того чтобы объяснить, почему большинство физиков приняли СТО только в 1910–1912 гг. (и почему вплоть до 1910 г. эйнштейновская теория и теория Лоренца практически не разделялись), мы должны отказаться от традиционного сравнения лоренцевской “теории электронов” только с эйнштейновской статьей “К электродинамике движущихся тел”. Мы должны рассмотреть *последовательность* работ Эйн-

штейна – Программу Эйнштейна. Но какую именно последовательность работ Эйнштейна необходимо рассмотреть?

Первым исследователем, давшим описание перехода “Лоренц – Эйнштейн” в рамках методологии научно-исследовательских программ (НИП), был ученик И.Лакатоша Э.Захар [3]. Он рассмотрел содержание “твердых ядер”, “позитивной и негативной эвристики”, “поясов защитных гипотез” программ Лоренца и Эйнштейна, конкуренцию этих программ [4] и предложил свое собственное объяснение причин победы программы Эйнштейна. Согласно Захару, решающей причиной победой релятивистской НИП над программой Лоренца стало выдвижение общей теории относительности (ОТО), обеспечившей подлинный “эмпирически прогрессивный сдвиг решаемых проблем” по отношению к теориям эфира.

Несмотря на то что захаровская реконструкция перехода “Лоренц – Эйнштейн” явилась значительным шагом вперед, она не может, как нам представляется, претендовать на статус окончательного объяснения. Это обусловлено, во-первых, тем, что большинство физиков – современников Эйнштейна и Лоренца перешли в лагерь сторонников релятивизма за несколько лет до создания ОТО. Во-вторых, в течение нескольких лет теории Эйнштейна и Лоренца рассматривались как одна и та же теория. Скажем, в статье “О методе определения соотношения между продольной и поперечной массами электрона” (1906 г.) сам создатель СТО сравнивает выводы трех теорий: теории Бухерера, теории Абрагама и теории Лоренца – Эйнштейна [5]. Таким образом, фактически эти теории сначала не различались научным сообществом и только после 1910–1912 гг. их интерпретации разошлись. В-третьих, все три эйнштейновских шедевра – статья по фотоэффекту [6], статья по броуновскому движению [7] и статья по специальной теории относительности [8] были опубликованы в одном и том же году, в одном и том же журнале с интервалами в несколько месяцев. Представляется, что это не случайно, должна существовать какая-то глубокая взаимосвязь между этими работами.

В чем состоит эта взаимосвязь? Для ее обнаружения необходимо, очевидно, обратиться к анализу работ Эйнштейна – статей, монографий, писем, лекций, заметок и т.д. Однако здесь существует одно затруднение: взгляды Эйнштейна часто менялись со временем, иногда на прямо противоположные. Это особенно верно, скажем, по отношению к его эпистемологической позиции, которая эволюционировала от радикального махизма до реализма а la Лейбниц. В этом нет ничего

удивительного, такое часто случается с интеллигентными людьми. Но это, к сожалению, приводит к тому, что цитатами из Эйнштейна можно доказать все что угодно. Поэтому необходимо обратиться не к околонучным рассуждениям, а к самим статьям, ограничив круг анализируемого материала сверху 1912-м годом. И наложенное ограничение определенно указывает на доклад, сделанный Эйнштейном в 1909 г. в г. Зальцбурге на 81-м съезде германских естествоиспытателей и врачей, как на практически единственную его попытку рассмотреть все свои работы в совокупности [9].

Доклад начинается со сжатого изложения теории эфира, которое завершается фразой: “Но сегодня мы должны считать гипотезу эфира устаревшей”. Почему? Важно, что для того, чтобы ответить на этот вопрос, Эйнштейн обращается не к опыту Майкельсона – Морли и не к гипотезе Лоренца – Фицджеральда. Вместо этого он анализирует “многочисленные факты в области излучения, показывающие, что свет обладает набором фундаментальных свойств, которые гораздо лучше могут быть поняты при помощи ньютоновской эмиссионной теории, чем при помощи волновой теории” [10]. Поэтому, считает Эйнштейн, “дальнейшее развитие физики даст нам теорию света, которая будет в каком-то смысле объединением волновой теории с теорией Ньютона” [11]. Таким образом, цель эйнштейновской программы – объединение, “слияние” волновой и эмиссионной теорий света. Но в чем состоит ее твердое ядро, позитивная и негативная эвристики, защитный пояс вспомогательных гипотез?

Ответить на эти вопросы поможет обращение к корреспонденции Эйнштейна. Но здесь, к сожалению, исследователя ожидают значительные трудности. Во-первых, оригиналы статей Эйнштейна, отправленных в редакцию “Annalen der Physik”, не сохранились. Во-вторых, несмотря на то что Эйнштейн активно обсуждал свои идеи не только с невестой (и впоследствии женой) Милевой Марич, но и с друзьями и единомышленниками – М.Бессо, К.Габихтом и др., – большинство писем также утрачены, а опубликованные воспоминания носят крайне неопределенный характер. Например, из всей переписки с Марич единственный пространственный отрывок (август 1899 г.), имеющий отношение к генезису СТО, выглядит следующим образом: “Я все более и более убеждаюсь в том, что электродинамика движущихся тел в том виде, в каком она существует сегодня, не соответствует действительности и что в будущем будет возможно представить ее в более простом виде. Введение понятия “эфир” в электрические теории привело к понятию

среды, о движении которой мы можем говорить только без приписывания этому понятию какого-либо физического смысла. Я полагаю, как это также подчеркивал Герц, что электрические силы непосредственно определимы только в пустом пространстве. Более того, электрические токи должны пониматься не только как “временные затухания электрической поляризации”, но и как движение действительных электрических масс, физическое существование которых представляется доказанным. Далее, электродинамика должна стать теорией перемещений в пустом пространстве движущихся электричеств и магнетизмов. Какая из этих двух картин должна быть выбрана, покажут только дальнейшие исследования” [12].

Уже в сентябрьском письме Милеве Марич от 1899 г. говорится о статье “о движении светоносного эфира относительно весомой материи”, встретившей холодный прием со стороны В.Вина, в письме от 17 декабря 1901 г. – “об исследовании по электродинамике движущихся тел, которое обещает стать капитальной работой”. Судя по всему, то же исследование упоминается в письме к Марич от 19 декабря 1901 г., где говорится о беседе с профессором Клейнером, который посоветовал Эйнштейну опубликовать его “идеи по электромагнитной теории света от движущихся тел вместе с экспериментальным методом”, и о том, что он собирается “наверняка написать об этом статью в течение ближайших нескольких недель”. Почему же не написал и не опубликовал? Насколько идеи этой задуманной статьи были идентичны идеям, изложенным в знаменитой статье “К электродинамике движущихся тел”?

К сожалению, имеющиеся историко-научные документы пока не позволяют дать убедительные ответы на эти вопросы. Более того, письма, относящиеся к наиболее интересному для нас периоду – с августа 1904 г. по март 1905 г., вообще отсутствуют [13]. Но уже первое письмо после долгого молчания, отправленное в мае 1905 г. К.Габихту, содержит ключ к ответам. В нем Эйнштейн обещает своему другу прислать отписки четырех своих статей, первую из которых он сможет послать достаточно скоро, поскольку скоро же получит и дополнительные отписки. “Эта статья, – пишет Эйнштейн, – посвящена излучению и энергетическим свойствам света и является *очень революционной*, как ты убедишься, если сначала пришлешь свою работу первым. ... Четвертая статья существует пока в виде *грубого наброска*, посвященного электродинамике движущихся тел и содержащего модификацию теории пространства и времени; чисто кинематическая часть этой статьи тебя определенно заинтересует” [14].

С нашей точки зрения, это письмо имеет важное значение: самой фундаментальной из четырех является, несомненно, первая статья. Далее, даже полного текста статьи по СТО в начале мая 1905 г. еще не было. Она была написана *после* работ по квантам и по броуновскому движению и, как нам представляется, является лишь частью программы. И это понятно: работа по СТО – первая и в то же самое время последняя фундаментальная статья по специальной теории относительности. Все остальные статьи представляют собой небольшие дополнения и обзоры. Обратимся к тексту статьи по фотоэффекту [15].

Несмотря на то что в литературе часто встречается утверждение, согласно которому в 1905 г. Эйнштейн намеревался объяснить аномальные для классической физики данные по фотоэффекту, обращение к истории этого явления позволяет говорить, что это не совсем так. Измерения этого эффекта в то время были недостаточно точны, для того чтобы безапелляционно свидетельствовать о нарушении предсказываемых классической теорией закономерностей [16]. Эйнштейн был не слишком озабочен данными по фотоэффекту и обращался к флуоресценции, фотоэлектричеству и фотоионизации только как к косвенному свидетельству в пользу своего основного тезиса. Напротив, главным предметом его заботы было противоречие между механикой и электродинамикой, о чем ясно говорит начало самой статьи, посвященной фотоэффекту: “Существует глубокое формальное противоречие между теоретическими представлениями физиков о газах и других весомых телах и максвелловской теорией электромагнитных процессов в так называемом пустом пространстве”.

В чем состоит это противоречие? “В то время как мы полагаем, что состояние тела полностью определяется положениями и скоростями хотя и очень большого, но ограниченного количества атомов и электронов, мы используем для определения состояния электромагнитного поля непрерывные пространственные функции, так что конечное число переменных не может считаться достаточным для полного определения электромагнитного поля в пространстве”.

Но это противоречие может привести к ситуации, когда “теория света, оперирующая непрерывными функциями в пространстве, придет в противоречие с опытом, будучи применена к явлениям образования и преобразования света”. Поэтому, полагает Эйнштейн, “наблюдения чернотельного излучения, фотолюминесценции, образования катодных лучей и других явлений могут быть лучше объяснены исходя из предположения, согласно которому энергия света прерывно распределена в пространстве”.

И в первой части своей знаменитой статьи Эйнштейн демонстрирует, каким образом совместное применение механических и электродинамических “теоретических картин” для описания чернотельного излучения приводит не только к противоречиям с экспериментом (а у него нет даже ссылок на работы Люммера и Принсгейма, а также Рубенса и Курльбаума), но и к парадоксу, который не может быть устранен обычными методами. Для этого Эйнштейн использует не реальные, а *мысленные* эксперименты с идеальными объектами обеих теорий. Он рассматривает воображаемую полость, содержащую свободное электромагнитное поле, молекулы газа и герцевские резонаторы. В результате получается, что совместное применение механики и электродинамики неизбежно приводит к закону Рэлея – Джинса. Но «это соотношение, которое мы нашли как условие термодинамического равновесия, не только не согласуется с экспериментом, но также показывает, что в нашей картине невозможно определенное распределение энергии между эфиром и материей», поскольку “чем больше интервал частот резонаторов, тем больше становится энергия излучения в пространстве,

и в пределе мы получаем $\int_0^{\infty} \rho \, dv = (R/N)(3\pi/L^3) \int_0^{\infty} v^2 \, dv = \infty$ ».

Таким образом, Эйнштейн был одним из первых, кто продемонстрировал, что совместное применение принципов и теоретических моделей статистической механики, классической термодинамики и максвелловской электродинамики приводит к парадоксу – “ультрафиолетовой катастрофе” (термин П.Эренфеста). Как он намеревался разрешить этот парадокс?

Наиболее естественное разрешение парадокса встречи теорий – это так называемый *редукционистский способ* [17], когда предполагается, что сам парадокс возникает потому, что встретившиеся теории не являются независимыми. Одна из них более глубокая, более “фундаментальная” по сравнению с другими встретившимися теориями. Поэтому парадокс может быть разрешен соответствующим *пересмотром* всей проблемной ситуации и демонстрацией того, что все модели встретившихся теорий фактически являются частными случаями принципов и базовых моделей фундаментальной теории. Именно в процессе доказательства сводимости всех вовлеченных в проблемную ситуацию принципов и моделей к принципам и моделям фундаментальной теории и должна быть найдена “ошибка”, возникшая из-за того, что одна из встретившихся теорий повела себя слишком независимо по отношению к фундаментальной. Эта ошибка легко устраняется при-

ведением всего аппарата “неправильной” теории в соответствие с аппаратом теории фундаментальной.

Однако Эйнштейн не мог пойти по этому пути по одной простой причине: фундаментальной и наиболее глубокой теории в совокупности встретившихся теорий не существовало. И он сам в своих собственных работах – как в тех, что были написаны до статьи по фотоэффекту, так и в работах, написанных параллельно с ней – многое сделал для того, чтобы это показать.

Во-первых, в работе, следовавшей прямо за статьей по фотоэффекту, и посвященной анализу броуновского движения, Эйнштейн показал, что законы термодинамики не могут быть универсально справедливыми, поскольку принципы статистической механики требуют, чтобы флуктуации приводили на микроуровне к нарушениям второго начала. Именно эти флуктуации и ответственны за наблюдаемое на макроуровне броуновское движение. Несколько позже, в 1907 г., Эйнштейн даже выделил главный тезис самой работы, – это определение границ применимости классической термодинамики [18].

Во-вторых, статистическая механика на роль фундаментальной теории также не годилась. В письме к Марич от 30 апреля 1901 г. Эйнштейн замечает: “Я в настоящее время снова изучаю больцмановскую теорию газов. Все это очень хорошо, но в ней недостаточно внимания уделяется сравнению с реальностью”. И действительно, как показал в своих недавних исследованиях Ю.Ренн, эйнштейновская интерпретация статистической механики начиная с 1902 г. была результатом реинтерпретации больцмановской версии – реинтерпретации настолько значительной, что его критика выдвинутой Друде электронной теории металлов была направлена не столько против Друде, сколько против Больцмана [19].

В-третьих, на роль фундаментальной теории не годилась и максвелловская электродинамика. Несмотря на то, что программа сведения всей физики к электродинамике, исследования в рамках которой возглавлял В.Вин, привела к значительным успехам, она “споткнулась” о проблему электромагнитной массы электрона. Ряд исследований, особенно работы Абрагама, Пуанкаре и Лоренца, показали, что только часть массы электрона – как протяженного, так и точечного – имеет электромагнитное происхождение.

Поэтому редуccionистский путь был для Эйнштейна закрыт. Единственным выходом оставался *синтетический* способ разрешения парадокса – создать такие, гибридные, модели процесса, которые содержали

бы черты моделей из всех встретившихся теорий. Создание подобных моделей говорит о том, что исследователь считает все встретившиеся теории одинаково глубокими и фундаментальными, – просто область реальности, которую он изучает, гораздо сложнее абстрактных теоретических схем каждой теории в отдельности [20]. Базисные модели каждой встретившейся теории слишком примитивны для отображения наиболее существенных черт реальности. Сама реальность гораздо сложнее этих моделей, находясь где-то посередине между крайними базисными идеализациями (или, в терминологии В.С.Степина, фундаментальными теоретическими схемами [21]) встретившихся теорий. Именно это и демонстрирует Эйнштейн при помощи полуэмпирического закона Вина во втором параграфе своей знаменитой статьи, посвященной фотоэффекту.

Эйнштейн применяет термодинамику ($dS = 1/T$), статистическую механику ($S = k \log W$) и максвелловскую электродинамику ($E = V \int \rho_v dv$) для описания области эмпирической реальности, охватываемой законом Вина. В статье по фотоэффекту он принимает $\beta = h/k = Nh/R$ в качестве неопределенной константы и поэтому пишет везде $R\beta/N$ вместо h . Совместное применение трех классических парадигм позволяет Эйнштейну прийти к следующему выводу: для монохроматического излучения частоты ν и энергии E , находящегося в объеме V_0 , вероятность W того, что в любой момент времени вся энергия излучения будет находиться в части V объема V_0 , записывается выражением

$$W = (V/V_0)^{E/h}. \quad (i)$$

Но в той же самой статье Эйнштейн демонстрирует, что в случае n независимо движущихся частиц в объеме V_0 вероятность одномоментного обнаружения их в части объема V есть

$$W = (V/V_0)^n. \quad (ii)$$

Сравнивая (i) и (ii), Эйнштейн приходит к выводу, что “монохроматическое излучение малой плотности ведет себя в термодинамическом отношении так, как будто оно состоит из независимых квантов энергии величиной $h\nu$ ”. Таким образом, “если монохроматическое излучение (достаточно малой плотности) в смысле зависимости энтропии от объема ведет себя как дискретное вещество, состоящее из квантов энергии $R\beta\nu/N$, то возникает вопрос: не являются ли законы возникновения и преобразования света такими, как если бы свет состоял из подобных же квантов энергии?”.

Таков вопрос, поставленный Эйнштейном в конце одного из разделов статьи, посвященной фотоэффекту. Но *концепция эфира препятствует положительному ответу на него*. В самом деле, “механические и чисто электромагнитные интерпретации оптических и электромагнитных явлений согласны друг с другом в том, что в обоих случаях электромагнитное поле рассматривается в качестве особого состояния гипотетической среды, заполняющей все пространство. Именно в этом пункте две отмеченные выше интерпретации радикально отличаются от теории истечения Ньютона, в которой свет состоит из движущихся частиц. Согласно Ньютону, пространство должно рассматриваться как не содержащее ни весомой материи, ни световых лучей, т.е. как абсолютно пустое” [22].

Для того чтобы создать квантовую теорию света, нам необходимы электромагнитные поля как независимые образования, способные испускаться их источниками, “совсем как в ньютоновской теории истечения” (т.е. энергия, передаваемая в процессе излучения, не должна рассеиваться в пространстве, а должна сохраняться вплоть до элементарного акта поглощения). Но в рамках программы Лоренца электромагнитное поле рассматривается как особое состояние эфира – состояние среды, непрерывно распределенной в пространстве. Элементарный акт излучения связан в подобной среде только со сферической волной. Более того, утверждает Эйнштейн, “в то время как в молекулярно-кинетической теории для каждого процесса, в котором участвуют только несколько частиц (например, для каждого столкновения молекул), всегда существует процесс обратный, в волновой теории картина резко изменяется. Согласно этой теории, осциллирующий ион излучает расходящуюся сферическую волну. Обратный процесс как элементарный не существует. Тем не менее сходящаяся волна математически возможна; тем не менее даже ее аппроксимация нуждается в бесконечном числе элементарных излучающих центров. Поэтому элементарный процесс излучения необратим. Именно в этом случае, как мне кажется, наша волновая теория не соответствует действительности. Я думаю, что в этом пункте ньютоновская теория истечения вернее волновой теории света” [23].

Необходимо иметь в виду, что отказ от представления об эфире и принятие “теории истечения” еще не означают принятия двух основных постулатов СТО – постулата относительности и постулата постоянства скорости света, но хорошо вписываются в теорию В.Ритца (1908 г.). Согласно его “баллистической гипотезе”, скорость кванта должна зависеть от скорости его источника. В теории Ритца скорость

света не постоянна, но равна $v+c$, где v – относительная скорость наблюдателя по отношению к скорости источника.

Теория Ритца была в определенной степени возвратом к старым концепциям действия-на-расстоянии, развивавшимся еще Вебером и Риманом. Ритц отказался от основных понятий электродинамики Максвелла – Лоренца. Он отказался от понятий электрического и магнитного поля и оперировал только понятием прямого, непосредственного взаимодействия между зарядами. В его теории сила взаимодействия зависела от расстояния между зарядами и от их состояний движения. После успешного объяснения ряда оптических и электромагнитных явлений (в частности, опыта Майкельсона – Морли) эта теория позволила предложить оригинальное разрешение ультрафиолетовой катастрофы (см. дискуссию Эйнштейна с Ритцем). Тем не менее у теории Ритца возникли серьезные трудности при объяснении наблюдений двойных звезд.

Таким образом, в баллистической теории Ритца скорости света и его источника должны складываться по закону сложения скоростей классической механики (формула Галилея), и это, конечно, противоречит понятию поля, на котором основана теория Максвелла. В самом деле, в теории Ритца конечная скорость электромагнитных возмущений в вакууме не зависит от их форм и скоростей их источников. Но в отличие от Ритца Эйнштейн и не думал отказываться от максвелловской теории, как и Ньютон, создатель эмиссионной теории, 300 годами ранее не отвергал волновую теорию. В своей статье по фотоэффекту Эйнштейн специально оговаривает, что “волновая теория, оперирующая точечными непрерывными функциями, великолепно оправдывает себя при описании чисто оптических явлений и, судя по всему, не будет заменена другой теорией” [24]. В теории Лоренца этой трудности вообще не существовало. Действительно, в системе отсчета, покоящейся относительно эфира, свет распространяется с постоянной скоростью, не зависящей от скорости источника. Это похоже на ситуацию с волнами от корабля, скорость которых в первом приближении не зависит от скорости корабля. Поэтому если мы хотим отбросить идею эфира, но сохранить в то же самое время теорию Максвелла, мы должны отмежеваться от баллистической гипотезы и постулировать специальный “принцип постоянства скорости света”. Позже в беседе с Р. Шенклендом Эйнштейн сообщил ему, что действительно рассматривал баллистическую гипотезу в качестве рабочей версии, но отказался от нее до 1905 г., поскольку не смог найти дифференциальное уравнение,

решения которого представляли бы волны со скоростями, не зависящими от скоростей их источников. Второй фундаментальный принцип СТО – “принцип относительности” сразу же следует из того “факта”, что эфира, и, следовательно, абсолютной системы отсчета не существует.

Эти два постулата – принцип относительности и принцип постоянства скорости света – вполне достаточны, согласно Эйнштейну, для создания электродинамики движущихся тел. Именно эти положения легли в основу твердого ядра релятивистской подпрограммы, тщательно описанной впоследствии Э.Захаром. Тем не менее, “для того чтобы теория, основанная на этих двух принципах, не приводила к противоречащим друг другу следствиям, необходимо отбросить обычное правило сложения скоростей” [25].

Это и было сделано Эйнштейном в статье “К электродинамике движущихся тел”, завершённой в мае и напечатанной в конце июня 1905 г., через несколько месяцев после публикации статьи по фотоэффекту. В этой статье Эйнштейн выявил скрытое допущение (основу правила сложения скоростей Галилея), что утверждения о временных интервалах, а также о формах движущихся тел не зависят от состояния движения системы отсчета. Он продемонстрировал, что принятие принципа относительности вместе с принципом постоянства скорости света эквивалентно модификации понятия одновременности и представлению о запаздывании часов в движущейся системе отсчета. “Таким образом, – утверждает Эйнштейн, – теория относительности изменяет наши представления о природе света в том отношении, что в ней свет распространяется не в связи с некоторой гипотетической средой, но как некая вещь, которая существует независимо, аналогично материи. И эта теория, подобно корпускулярной теории света, признает перенос массы от излучателя к поглотителю” [26].

Если все сказанное выше справедливо, то неизбежно возникает вопрос: *почему в работе по СТО Эйнштейн не ссылался на свою работу по квантам света?* Посылая К.Габихту плоды своих трудов, он охарактеризовал работу по квантам как “очень революционную”, в то время как работа по теории относительности удостоилась лишь характеристики “интересной в кинематическом отношении”. Современники Эйнштейна оценивали эти работы сходным образом. Поэтому ссылка в статье, вводящей радикальные изменения в представления о движении (в основном метафизического характера), на гипотезу, введившую еще более революционные изменения, едва ли могла усилить аргументацию. Даже в 1916 г. Р.Милликен заявлял, что “несмотря на... практически полный успех урав-

нения Эйнштейна (для фотоэффекта), физическая теория, символическим выражением которой это уравнение является, представляется настолько неприемлемой, что Эйнштейн сам”, как кажется Милликену, “больше в нее не верит” [27]. Ситуация осложнялась еще и тем, что прямых экспериментальных данных, говорящих в пользу световых квантов, тогда еще не было. Они появились только в 1923 г. (эффект Комптона). Поэтому, например, немецкие ученые, стараясь изо всех сил избрать Эйнштейна в 1914 г. в Берлинскую академию наук, должны были оговориться, что защита им световых квантов является неизбежной ценой, которую приходится платить за его творческий гений. Тем не менее негативное отношение к квантовой гипотезе со стороны докомптоновского научного сообщества не стоит преувеличивать, как это делает, скажем, А.Пайс, настаивающий на том, что “с 1905 г. по 1923 г. Эйнштейн был единственным или почти единственным аутсайдером, принимавшим идею световых квантов всерьез” [28].

Так ли это? Как тогда объяснить большое количество американских публикаций по эмиссионным теориям – работы Комптона (1910 г.), Толмена (1910 г.), Стюарта (1911 г.), Траубриджа (1911 г.), Лауба (1912 г.) и др.? В этом плане типичным является следующее утверждение из работы Я.Кунца: “...В то время как принцип относительности и теория излучения Планка предполагают прерывности в излучении и поглощении света, существует множество оптических явлений указывающих на корпускулярное строение света и рентгеновских лучей [29]”. И как тогда понимать теорию Дж.Льюиса (подробнее см. следующий раздел)? Кроме того, имеется и свидетельство очевидца, представленное уже в наши дни, на юбилейной эйнштейновской конференции:

“Г.Д. Смит (Принстонский университет): Тезис, который я хочу отстаивать перед профессором Клейном, основан на моем понимании его комментария, согласно которому сообщество физиков в действительности не принимало идею корпускулярной природы света вплоть до комптоновских экспериментов. Но я обучался физике здесь, в Принстоне, в 1918 и 1919 гг., и тогда ни у кого даже вопросов по этому поводу не возникало. Мы знали эксперимент Милликена, мы знали множество других опытов, в которых исследователи стремились точно получить максимум энергии фотоэлектронов; мы знали об опытах Франка и Герца. Да вся экспериментальная программа Карла Комптона была основана на идее корпускулярной природы света по меньшей мере как на рабочей гипотезе.

Клейн: Ну, я не могу спорить с Вашей памятью...” [30].

Поэтому неудивительно, что статья по фотоэффекту отличается от статьи по СТО как *более осторожным заголовком* (“Об одной эвристической точке зрения ...”), так и *менее категоричным тоном основного вывода*: “В дальнейшем я постараюсь подытожить результаты моих размышлений и факты, которые привели меня к этому выводу, в надежде на то, что предлагаемая точка зрения *может оказаться полезной* для некоторых исследователей в их работе” (статья по световым квантам). Сравним со следующим заключением: “Недостаточное понимание этих особенностей является источником затруднений, которые должны быть преодолены электродинамикой движущихся тел” (статья по СТО).

Таким образом, Эйнштейн имел весомые причины не ссылаться при изложении специальной теории относительности на свою работу по квантам света. Но, конечно, его скрытые симпатии к фотонам проступали сквозь объективистски-респектабельный стиль “электродинамики движущихся тел”. В работе по СТО вместо термина “квант света” Эйнштейн применил более нейтральный оборот – “световой комплекс”. В восьмом параграфе статьи по фотоэффекту используются отношения амплитуд, полученных в предыдущем параграфе, для нахождения отношения энергий полей в некоторой замкнутой полости в двух координатных системах. Эти отношения в точности совпадают с отношением частот. Естественно, СТО и фотонная теория хорошо согласовывались друг с другом.

Предположим, что у Эйнштейна были серьезные причины не раскрывать связь между статьей по фотоэффекту и статьей по СТО в начале XX в. Но почему же он не признался в том, что такая связь существует, позже, уже получив Нобелевскую премию, например когда его формула по фотоэффекту была окончательно подтверждена и комптоновские эксперименты были уже благополучно поставлены?

Ключ к ответу на этот вопрос содержится в действиях Эйнштейна по созданию общей теории относительности (ОТО). В письме к Лоренцу, написанном в июне 1916 г., он признается, что “общая теория относительности ближе к гипотезе эфира, чем специальная теория относительности”. Почему? Ответ может быть найден в его статье 1918 г. [31]. “Общая теория относительности не знает выделенного состояния движения в точке, которое могло бы быть интерпретировано как, так сказать, скорость в эфире. Тем не менее, в то время как в специальной теории относительности область пространства без материи и без электромагнитного поля является абсолютно пустой, т.е. характеризуемой

полным отсутствием физических величин, согласно общей теории относительности даже пространство пустое в этом смысле обладает физическими свойствами, описываемыми математически компонентами гравитационного потенциала, которые характеризуют метрическое поведение, так же как гравитационное поле данного участка пространства. Мы можем понять эту ситуацию, введя понятие эфира, состояние которого изменяется от точки к точке”.

Идея, согласно которой пространство обладает физическими свойствами (т.е. эфиру должно быть приписано свойство независимого существования), была для Эйнштейна связана с возможностью существования метрики без материи. Вне всякого сомнения, Эйнштейн в данном случае находился под влиянием Лоренца. В письме от 15 ноября 1919 г. он признается: “Я изложу свою точку зрения на проблему эфира самым исчерпывающим образом как только представится для этого случай. Было бы лучше, если бы в моих предыдущих публикациях я ограничивался утверждением о том, что нереальна только скорость эфира, а не сам эфир как таковой. Я понял, что термин “эфир” связан лишь с признанием того, что пространство может быть носителем физических свойств”.

Теперь понятно, почему, первоначально сформулировав СТО на квантовой основе, Эйнштейн не любил об этом вспоминать. Одна из причин – создание общей теории относительности и пламенная вера в фундаментальный характер метрики. Вплоть до последних своих дней Эйнштейн был сторонником сведения всего на свете к геометрии, и фотон не был исключением. Всю свою жизнь Эйнштейн надеялся, что когда-нибудь фотон также будет сконструирован из соответствующих геометрических величин, например, как у Калуцы и Клейна.

Итак, в статье, посвященной СТО, Эйнштейн не ссылается ни на статью по световым квантам, ни на парадокс чернотельного излучения. Наоборот, он начинает эту статью с описания асимметрии в движениях магнита и проводника, которая становится явной для того, кто знает, что ни эфира, и ни абсолютной системы отсчета не существует. При этом без указания на связь с квантовыми результатами постулаты СТО могут быть оценены как гипотезы *ad hoc*, что фактически и произошло (А.Пуанкаре и французская школа). Поэтому Эйнштейн и пытался убедить своих читателей в том, что “сходные примеры, так же как неудачные попытки обнаружить движение Земли относительно светоносного эфира, ведут к предположению, что не только в механике, но и в электродинамике ни одно свойство событий не относится к понятию абсолютного покоя”.

2. Эйнштейновская революция: контекст подтверждения

Предсказания теории Лоренца были идентичны предсказаниям СТО, поэтому сравнение эмпирических следствий из этих теорий не позволяло сделать однозначный выбор в пользу какой-либо одной из них. Более того, многие современники Эйнштейна писали об “электронной модели Лоренца – Эйнштейна”, о “принципе относительности Лоренца и Эйнштейна” и т.д. После публикации лоренцевской теории второго порядка (1904 г.) единственными опытными данными, с помощью которых можно было проверить эти теории, стали кауфмановские измерения масс медленно движущихся электронов. Но сначала они интерпретировались как противоречащие одновременно *обеим* теориям. Эйнштейну потребовался год для того, чтобы как-то отреагировать на результаты статьи Кауфмана. Можно себе представить, как воспринималась СТО научным сообществом в 1905–1906 гг.!

Далее, Эйнштейн не раскрыл связи между статьей по фотоэффекту и статьей по молекулярно-кинетической теории [32] вплоть до 1909 г. Но без этой связи постулаты СТО могут восприниматься как гипотезы *ad hoc*, и некоторыми исследователями они так и воспринимались! Реакция А.Пуанкаре и всей французской школы – один из наиболее ярких тому примеров. Поэтому для того чтобы объяснить причины победы Эйнштейна над Лоренцем, сравнения эфирной программы с релятивистской недостаточно. Необходимо принимать во внимание успехи эйнштейновских статистических работ и развитие квантовой подпрограммы.

Подробно генезис ранней квантовой теории в работах М.Планка будет рассмотрен в третьем разделе настоящей статьи. Пока же для нас важно то, что в 1906 г. Эйнштейн и Эренфест были, судя по всему, первыми исследователями, которые осознали, что планковский закон чернотельного излучения не может быть выведен без квантования энергии планковских резонаторов. Вплоть до 1908 г. их работы не оказали значительного влияния на научное сообщество, но статья, представленная Лоренцем в 1908 г., серьезно изменила отношение сообщества к квантам. “...Мы не можем уклониться от выводов Джинса, – писал Лоренц, – по крайней мере без глубокого изменения основ классической теории” [33].

Таким образом, закон Рэлея – Джинса и ультрафиолетовая катастрофа сначала не создавали ни для кого проблем, разве что для не-

большой группы физиков. Но в конечном счете они стали для физиков центральными из-за большого количества попыток получить эти результаты заново при помощи разнообразных методов. Так что в конце 1909 г. Лоренц, Вин и сам Планк сумели убедить всех, что теория излучения требовала введения дискретности. Даже А.Зоммерфельд и Дж.Джинс в 1910 г. начали склоняться к этой позиции. Но после 1910 г. лидерство в квантовой области перешло к проблеме удельных теплоемкостей, хотя к 1911 г. важными сферами применения квантовой подпрограммы стали исследования по рентгеновскому излучению, фотоэффекту (опыты Штарка и Баркла), люминесценции, атомные теории – все они обеспечивали “постоянный эмпирически-прогрессивный сдвиг решаемых проблем”.

Серьезным успехом стало подтверждение в 1911 г. В.Нернстом эйнштейновской формулы для удельных теплоемкостей (1907 г.). Если “планковская теория отражает глубинную суть вещей”, то мы должны, согласно Эйнштейну, серьезно изменить и основания статистической механики.

И наконец, первый сольвеевский конгресс (1911 г.) достаточно определенно показал неспособность классической механики и классической электродинамики решить проблемы, коренящиеся в теории излучения. “Судя по всему, итогом обсуждения этих вопросов стало общее признание неспособности классической электродинамики описывать поведение систем атомных размеров”, – писал Н.Бор [34].

Таким образом, *несмотря на то, что гипотеза световых квантов должна была ждать общего признания более 10 лет, успехи квантовой теории в целом выбили почву из-под ног волновой теории излучения и концепции эфира, лежавшей в ее основе.* Как утверждают историки науки, из всех ведущих физиков, которые работали в области чернотельного излучения, только Рэлей не занимался также и проблемами теории относительности. Даже статья Джинса, в которой он впервые заявил о принятии теории квантов, имела релятивистский заголовок: “Планк и неклассическая механика”.

Физики в самых разных странах с самыми разными культурными традициями неоднократно отмечали, что именно квантовая теория вела к отказу от представления об эфире. Так, Н.Кемпбелл (Тринити Колледж, Кембридж) начал свой обзор (1910 г.) с заявления о том, что “положение концепции эфира в современной физике является аномальным и неудовлетворительным... Несомненно, что в значительной мере неудовлетворенность эфиром основана на недавних теориях атомной

природы излучения и на доказательстве, что принцип относительности является адекватным основанием электромагнитной теории” [35]. Вывод, который делает автор в этой работе, не менее интересен: “Моей целью не является анализ всех аргументов, которые могут быть выставлены против этой идеи, но лишь тех, которые представляются мне наиболее разрушительными в настоящее время. Недавняя работа Бухерера и атомные теории Дж. Дж. Томсона и Планка (недавно развитая Старком) представляют для эфирной теории такие результаты, которые ей трудно будет либо ассимилировать, либо по-своему переобъяснить” [36].

Аналогичные соображения высказывались в то же самое время в США – одним из создателей эмиссионных теорий света Я. Кунцем [37], в России – Д. А. Гольдгаммером, О. Д. Хвольсоном, П. Эренфестом. Но наиболее прямым свидетельством в пользу связи СТО и ранней квантовой теории является статья “Пересмотр фундаментальных законов материи и энергии”, опубликованная в ноябре 1908 г. в ведущем английском журнале “Philosophical Magazine”. Ее автором был американский физико-химик Дж. Льюис, впоследствии, в 1926 г., придумавший термин “фотон”. Он начинает статью с постулата, согласно которому энергия и импульс луча обязаны своим существованием массе, движущейся со скоростью света. Исходя только из этого постулата Льюис демонстрирует, что масса тела зависит от его энергии и что поэтому необходимо заменить аксиому ньютоновской механики, согласно которой масса тела не зависит от его скорости. Наоборот, масса тела зависит от его скорости, так что она становится бесконечной в случае достижения телом скорости света. Полученное Льюисом уравнение согласовывалось с результатами опыта Кауфмана. Он также получил уравнение $E=mc^2$, которое вывел и Эйнштейн “из общих уравнений электромагнитной теории при помощи так называемого принципа относительности”. “То, что совершенно отличный метод ведет к одному и тому же результату, к простому уравнению, которое мы здесь получили, – писал Льюис, – говорит о справедливости нашего фундаментального постулата” [38].

Согласование СТО и ньютоновской теории гравитации привело к созданию общей теории относительности. Ее успехи (и прежде всего объяснение перигелия Меркурия) и энтузиазм ее сторонников в научных кругах также помогли в вытеснении классической физики, как это убедительно показал впоследствии Э. Захар. Правда, экспериментальные успехи общей теории относительности могут показаться достаточно скромными в сравнении с квантовой программой. Успехи же

последней настолько хорошо известны, что достаточно отметить лишь наиболее значимые. Это – результаты Ч.Баркла (1908 г.), подтвердившие справедливость правила Стокса для рентгеновских лучей, экспериментальное подтверждение формулы Эйнштейна для фотоэффекта Р.Милликеном (1916 г.) и т.д.

Итак, где-то к 1910 г. постулаты СТО стали восприниматься как независимые принципы, а не только как следствия из теории Лоренца. Можно сказать, что в это время начинается “дивергенция” программ Лоренца и Эйнштейна. Квантовая подпрограмма дает результаты, которые становится все труднее и труднее переобъяснить в рамках программы Лоренца, и начинает понемногу вытеснять классическую физику из своей предметной области. Особенно сильное впечатление произвели атомные модели Бора. Можно также упомянуть работу Шредингера по эффекту Допплера для световых квантов (1922 г.), работы Бозе и Эйнштейна по новой статистике, диссертацию Де Бройля и, наконец, эксперименты Комптона (1923 г.), убедительно показавшие, что “рассеяние рентгеновских лучей является квантовым процессом”.

3. Генезис ранней квантовой теории в работах Макса Планка

Подавляющее большинство работ по истории и философии ранней квантовой теории [39] основаны на явно или неявно принимаемом положении о том, что эта теория была создана в результате “дедукции из явлений” (deduction from phenomena – термин Дж.Нортон). А именно, в академической истории науки история создания ранней квантовой теории часто рассматривается в качестве образца (case study), когда создание теории определяется опытными данными. Согласно хорошо известным нарративам, “критические эксперименты” Люммера – Прингсхейма и Рубенса – Курльбаума опровергли классическую теорию чернотельного излучения и привели к созданию теорий Планка и Эйнштейна в качестве прямых обобщений полученных опытных данных. Тем не менее более тщательный историко-научный и методологический анализ в гораздо большей мере свидетельствует, на наш взгляд, в пользу следующих тезисов.

1. *В конце XIX в. не было такой теории, как классическая теория образования и распространения излучения в многочастичных системах.* В частности, классической теории излучения абсолютно черного тела вообще не существовало. Она появилась только *после* статей План-

ка, посвященных квантам, во многом благодаря работам Рэлея и Джинса и получила признание благодаря вкладу Лоренца только начиная с 1908 г. В то же время планковская формула излучения черного тела была выведена уже в 1899 г. Более того, значительная часть вклада Эйнштейна в создание ранней квантовой теории относится к 1905–1907 гг. С другой стороны, виновская “классическая” формула, описывавшая зависимость плотности излучения черного тела от частоты, была полуфеноменологической, полученной методом *ad hoc* и еще должна была быть переполучена Планком строго теоретическим образом исходя из “первых принципов” фундаментальных теорий. Действительно, Планк применил аппарат электродинамики, термодинамики и статистики для существенного улучшения результатов Вина.

2. С другой стороны, введение Эйнштейном световых квантов – это отнюдь не судорожные попытки “спасения явлений” и объяснения тех “жестких фактов”, которые не могли быть объяснены классическими теориями (подробнее см. первый раздел настоящей статьи). Эйнштейн апеллировал к данным по флюоресценции, фотоэлектричеству и фотоионизации только как к *косвенному подтверждению* своей гипотезы о световых квантах, но они не были исходным пунктом его теоретических построений.

3. В *современной* литературе история ранней квантовой теории ни в коем случае не рассматривается в качестве образцового случая вывода теории из данных опыта. Напротив, считается, что здесь имеет место значительная *недоопределенность* теории опытом.

Однако, во-первых, в 1969–1984 гг. Т.Бойер убедительно показал, что большинство явлений, относящихся как к ранней, так и к поздней квантовой теориям (начиная с планковского закона излучения), могут быть объяснены чисто классическим образом в рамках разработанной им “стохастической электродинамики” [40]. Наличие стохастического классического электромагнитного излучения с нулевой температурой и лоренц-инвариантным спектром так изменяет идеи классической теории электронов, что позволяет обеспечить в рамках последней три разных по способам, но одинаково классических вывода планковского распределения.

Во-вторых, как показал Р.Хадсон, в противоположность мнениям Эйнштейна, Джинса и Пуанкаре, закон Рэлея – Джинса [41] – это вовсе не тот закон, который должен следовать из классической физики, поскольку его вывод требует принятия *ad hoc* гипотезы о равном рас-

пределении энергии излучения по степеням свободы. И многие сторонники классической физики (такие, например, как Л.Больцман) не приняли ни этот закон, ни классическую теорему о равном распределении энергии по степеням свободы.

Поэтому цель настоящего раздела нашей статьи – представить такую рациональную реконструкцию генезиса ранней квантовой теории, которая могла бы привлечь во внимание особенности, сформулированные в приведенных выше тезисах 1–3. Иными словами, наша цель – сделать еще один шаг на пути более полного теоретического воспроизведения квантовой революции и пролить свет на *интертеоретические отношения* между квантовой теорией и другими современными ей теориями, раскрыв их роль в генезисе и утверждении теории квантов. Это обосновано прежде всего тем, что новые идеи возникли благодаря попыткам согласовать между собой три классические научно-исследовательские программы (парадигмы) классической физики.

В конце XIX в. в творчестве М.Планка встретились и вступили во взаимодействие три относящиеся к классической физике научно-исследовательские программы: термодинамика, теория электромагнетизма и статистическая механика. До 1900 г. Планк внес значительный вклад в развитие каждой из них, но величина этого вклада последовательно уменьшалась по мере перехода от термодинамики к теории Максвелла и от нее к больцмановской. Термодинамика была для Планка образцом научной теории. Его исследования в этой области были хорошо известны и общепризнаны, когда он, с большими колебаниями и без особого энтузиазма, обратился к электродинамике. Статистическая механика стала предметом его размышлений много позже и в еще большей степени по мере преодоления значительного внутреннего сопротивления. Для Планка как электродинамика, так и статистическая механика носили сначала вспомогательный характер. Уравнения Максвелла и больцмановская статистическая техника явились концептуальными инструментами решения сначала проблемы необратимости, а затем проблемы теоретического описания спектра излучения абсолютно черного тела.

Как уже отмечалось, “классической теории излучения черного тела” до работ Планка вообще не существовало. Что же было? Было множество феноменологических и полуфеноменологических законов, полученных или за счет прямого, непосредственного обобщения опытных данных, или благодаря часто физически бессодержательным гипотезам *ad hoc*.

Например, в 1879 г. Й. Стефан в качестве экстраполяции результатов предыдущих экспериментов показал, что зависимость плотности чернотельного излучения u от температуры T описывается выражением $u = \sigma T^4$. Затем С. Ленгли, В. Михельсон, Г. Вебер и Ф. Пашен получили выражения для распределения плотности чернотельного излучения $u(v, T)$ за счет экстраполяции экспериментальных данных, и, наконец, В. Вин попытался получить выражение для $u(v, T)$ из теоретических соображений, но сначала крайне спекулятивным образом.

В модели Вина источником чернотельного излучения служил разогретый газ. Следуя идеям русского физика В. Михельсона, Вин показал, что в таком газе число молекул со скоростями в интервале между v и $v + dv$ в соответствии с максвелловским распределением пропорционально $v^2 \exp(-v^2/\alpha^2)$, где α пропорционально температуре газа T . Если мы примем достаточно противоестественное допущение о том, что как частота, так и интенсивность излучения данной молекулы являются функциями только ее скорости, то распределение плотности энергии должно подчиняться выражению $u(v, T) = F(v) \exp(-f(v)/T)$. После определения F и f Вин пришел к следующему выражению (в современных обозначениях, с использованием более точных значений констант): $u(v, T) = 8\pi h v^3 / c^3 \exp(hv/kT)$.

Конечно, как теоретический результат, закон распределения Вина пользовался не очень большим авторитетом, до тех пор пока в 1899 г. Планк не переполучил его кардинально иным образом. Способ, который применил Планк, возвел эмпирическую закономерность, полученную достаточно сомнительным способом, в ранг теоретического закона с областью применимости $hv / kT \gg 1$. Поэтому работы Планка явились, по сути дела, первой попыткой создания настоящей *теории* чернотельного излучения, попыткой вывода выражения для плотности излучения $u(v, T)$ из “первых принципов” термодинамики и электродинамики, в противоположность тщетным попыткам угадывания правильного выражения за счет анализа опытных данных. Само собой разумеется, что Планк встретил на этом пути много трудностей, строя теоретические модели разного рода, сравнивая их с данными опыта, модифицируя их и т.д.

Планк был теоретиком *par excellence*, человеком, для которого образцом научной теории являлась термодинамика. Не в последнюю очередь это объяснялось тем, что во времена Планка термодинамика стала общепризнанной, хорошо проработанной теорией с широкой областью практических приложений. Когда Планк пришел к заключению, что термоди-

намики недостаточно для анализа теплового излучения, он обратился к максвелловской электродинамике – молодой и в те времена достаточно сомнительной области исследований, области, эмпирическое подтверждение которой еще только начиналось. Но пытаясь объяснить явление необратимости, Планк был вынужден ввести в свою теоретическую схему вибрирующие незатухающие резонаторы – крошечные осциллирующие токи, подчиняющиеся уравнениям Максвелла. Эти осцилляторы, конечно, никакого отношения к эксперименту не имели. Они не имели никакого отношения ни к молекулам, ни к атомам, будучи теоретическими абстрактными объектами, сконструированными Планком для поддержания термодинамического равновесия между материей и излучением.

В 1897 г. Планк опубликовал первую статью в серии работ, которая называлась “О необратимых процессах излучения”. Во всех пяти статьях этой серии [42], так же как и в главной статье, подводившей итоги исследований и опубликованной в 1900 г. в “Annalen der Physik” [43], он рассматривал свойства идеальной модели, состоявшей из системы резонаторов, взаимодействовавших с электромагнитным полем. Однако уже после того как Планк доложил о своих результатах в Академии, перед той же самой аудиторией выступил с критикой Больцман. Последний указывал, что несмотря на то что планковские выражения для поглощения и излучения энергии осцилляторами были справедливы, сама программа, для реализации которой они использовались, должна была рано или поздно потерпеть провал. Как сами уравнения Максвелла, так и необходимые для их решения граничные условия были инвариантны относительно обращения времени, замены t на $-t$. Когда же применение уравнений Максвелла оказалось недостаточным, Планк вынужден был применить статистику – крайне неохотно, шаг за шагом, под постоянным напором экспериментальных данных.

Следующая история здесь особенно уместна [44]. Планк, намеревавшийся расширить область применимости статистической термодинамики, развил (при помощи классических непрерывных представлений) термодинамику электромагнитного излучения и попытался ввести понятие энтропии излучения по аналогии с его энергией. Будучи сторонником знаменитого Л.Больцмана, Планк сообщил основателю статистической механики о своих исследованиях и даже представил на его суд одну из своих статей. Но Больцман ответил Планку, что тот никогда не сможет построить корректную теорию статистической термодинамики излучения без введения дотоле неизвестного элемента прерывности в процессы излучения.

“Больцмановское наследство” было противоречивым и дискуссионным. Сначала Планк попытался продвинуться вперед за счет использования электромагнитного аналога больцмановской H -теоремы, но когда этого оказалось недостаточным, он вынужден был применить вероятностное исчисление и комбинаторное определение энтропии, которое ему не нравилось. Таким образом, “самое позднее к середине зимы 1897–1898 г. Планк стал внимательно изучать больцмановскую версию второго начала, стал использовать положения, которые он там нашел, и пересмотрел или почти полностью пересмотрел свое отношение к больцмановскому подходу. К огорчению историков науки, он не признавался в этих переменах на протяжении почти двух лет, и это создало почти единодушное впечатление о том, что его переход к статистическому мировоззрению был вызван введением в конце 1900 г. квантовой гипотезы” [45].

Тем не менее, имеются прямые свидетельства самого Планка, относящиеся, правда, ко времени после рассматриваемых событий. В письме к Р. Вуду он признался: “Больцман объяснил существование термодинамического равновесия равновесием статистическим. Если его соображения применить к равновесию между веществом и излучением, мы придем к заключению, что можно избежать [требуемого классической физикой] перехода всей энергии в излучение за счет предположения, что энергия с самого начала должна существовать в дискретных порциях” [46]. Впоследствии Планк вспоминал, что всю свою жизнь, будь то переписка или непосредственное общение, Больцман был подчеркнуто сух с ним. И только в последние годы, после того как Планк сообщил Больцману об атомистическом обосновании закона излучения, тот радикально изменил свое отношение к нему на дружеское.

Таким образом, к началу 1900 г., только один аспект больцмановского подхода к необратимости все еще отсутствовал в исследованиях Планка, – это использование комбинаторики; но к концу того же года Планк начал использовать также и этот аппарат. Однако на этот раз обратиться к комбинаторике его заставила не проблема необратимости, а поиск закона излучения, способного соответствовать новым, уточненным опытным данным.

Единственным серьезным недостатком вывода виновского закона распределения, который Планк направил в редакцию “*Annalen der Physik*” в ноябре 1899 г., было отсутствие доказательства однозначности функции, определенной им для энтропии осциллятора. В то же самое время О. Люммер и Е. Прингсхейм, апеллируя к результатам своих

собственных измерений частотного распределения излучения в первой в истории физики лабораторной полости с чернотельным излучением, выдвинули новую формулу для чернотельного излучения, расходящуюся с законом Вина. Недоразумение было устранено Планком в статье, подписанной к публикации в феврале 1900 г. В ней Планк впервые не просто определил, а *вывел* выражение для энтропии осцилляторов, подержав закон Вина.

Однако экспериментальные данные оказались более упрямыми. В статье, излагавшей результаты, которые были доложены физической секции съезда Общества немецких естествоиспытателей уже 18 сентября 1900 г., Люммер и Прингсхейм заявили, что закон распределения Вина – Планка противоречит их данным по измерениям спектра чернотельного излучения в длинноволновом диапазоне. В этом интервале расхождения между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными составили около 50% и, конечно, не могли быть обусловлены обычными ошибками измерений, поскольку использовалась новейшая измерительная техника.

Несмотря на наглядность данных, полученных Люммером и Прингсхеймом, Планк был теперь хорошо подготовлен к встрече с трудностями. В статье, представленной Физическому обществу 19 октября, он сослался на содержащееся в работе, посланной в марте в “Annalen der Physik”, доказательство закона Вина, и еще раз отметил его недостаток. Энтропия n осцилляторов должна, писал он, зависеть не просто от их общей энергии, как это предполагалось ранее, но от энергии U отдельного осциллятора. Выражение $\partial^2 S/\partial U^2 = -\alpha/U$, найденное ранее, является слишком простым и должно быть заменено на более сложное. И Планк нашел уравнение, которое “является простейшим из всех выражений, содержащих S в качестве логарифмической функции U (условие, выдвигаемое теорией вероятности), и которое, кроме того, совпадает с законом Вина для малых значений U ”. Если выражение для S рассматривается в качестве первого члена $-U/\alpha$ в степенном разложении $\partial^2 S/\partial U^2$, его новая форма непосредственно получается добавлением термина, пропорционального U^2 . Вместе с $\partial^2 S/\partial U^2 = -\alpha/U(U+\beta)$, двумя интегрированиями, стандартным условием $\partial S/\partial U = 1/T$ и применением закона смещения мы получаем новый закон распределения $U = bv/\exp(\alpha v/T) - 1$. Эта формула, утверждал Планк, “по крайней мере на первый взгляд, соответствует уже опубликованным наблюдательным данным так же хорошо, как лучшая предложенная ранее функция распределения”. Поэтому он был “глубоко удовлетво-

рен тем, что привлек к этой новой формуле внимание”, так как считал ее “с точки зрения электромагнитной теории излучения самой простой, кроме формулы Вина”.

Новые измерения быстро продемонстрировали превосходство последнего уравнения над всеми предыдущими законами распределения. Но Планк должен был еще найти способ вывода этой формулы, который был бы в меньшей степени *ad hoc*. “В тот самый день, – пишет Планк, – когда я сформулировал этот закон, я посвятил свои исследования задаче выявления его физического смысла, что привело меня к рассмотрению соотношения между вероятностью и энтропией и, таким образом, к больцмановскому способу рассуждений” [47]. Как справедливо отмечал Т.Кун, эти слова Планка часто интерпретировались таким образом, что Планк будто бы оставил феноменологическую термодинамику и обратился к термодинамике статистической. Однако это произошло по меньшей мере за год до того времени, к которому относится приведенное заявление, а самое вероятное – тремя годами ранее. Когда Планк ссылался на “соотношение между энтропией и вероятностью”, он имел в виду не статистический подход как целое, но больцмановское комбинаторное определение вероятности. Судя по всему, он обнаружил это определение в больцмановской “Теории газов”, оказавшись, наверное, первым, кто это определение вообще обнаружил.

Первоначальный вывод Планком закона Вина содержал внутреннее противоречие: n рассмотренных им резонаторов предполагались независимыми, но его аргумент зависел от предположения, что их общая энергия U_n была распределена между ними поровну. Исправленный, улучшенный аргумент должен был основываться на рассмотрении различных способов, которыми энергия могла быть распределена между резонаторами, так же как Больцман в своих комбинаторных аргументах распределил общую энергию газа между его молекулами. Из планковского распределения $U = bv / \exp(\alpha v/T) - 1$ можно получить выражение для $1/T$ как функции U и v , а $1/T$ есть лишь $\partial S/\partial U$. После интегрирования мы получаем

$$S = (b/a) \log \left\{ (1+U/bv)^{1+U/bv} / (U/bv)^{U/bv} \right\} + \text{const.}$$

Планк, судя по всему, должен был воодушевиться тем, что эта формула напоминала больцмановское выражение для логарифмического соотношения между энтропией и вероятностью. Тем не менее это выражение применимо только к одному резонатору в равновесии с по-

лем излучения и еще не годится для интерпретации в вероятностных терминах. Поэтому представим N независимых резонаторов с частотой ν в равновесии с их собственным полем излучения. Их общая энтропия должна быть равной NS , а их общая энергия должна быть равной NU . В случае введения комбинаторий общая энергия должна подразделяться на P элементов с размерами ϵ , так что $P\epsilon = NU$. Умножив планковское выражение для s на N и подставив $P\epsilon/N$ вместо U , получим

$$S_N = (b/a) \log \left\{ (N+P\epsilon/b\nu)^{N+(P\epsilon/b\nu)} / N^N (P\epsilon/b\nu)^{P\epsilon/b\nu} \right\} + \text{const.}$$

Для того чтобы получить выражение, содержащее только целые числа, размеры элемента энергии ϵ должны быть положены равными $b\nu$. Тогда выражение в фигурных скобках сведется для больших N и P , к $(N+P-1)! / (N-1)!P!$. Но это стандартное выражение для числа способов, которыми P неразличимых элементов могут быть распределены по N различным ячейкам. Таким образом, первый этап использования Планком больцмановского соотношения между энтропией и вероятностью был завершен.

Однако сама проблема оставалась. Комбинаторное выражение, открытое способом “от противного”, исходящего из планковского закона распределения, еще очень сильно отличалось от той формулы, которую Больцман получил в процессе вывода функции распределения для газовых молекул. Поэтому Планк должен был показать, что его формула описывает вероятность, соответствующую равновесному излучению. Требовалось подсчитать энтропию определенного распределения общей энергии E по N резонаторам и затем найти ее максимум по отношению к изменению энергии в зависимости от частоты. Для подсчета энтропии произвольного распределения Планк должен был ввести комбинаторику и последовать Больцману в разбиении энергии континуума на элементы конечной величины. “Теперь, – писал он, – мы должны задать распределение энергии по резонаторам каждой группы, прежде всего распределение энергии E по N резонаторам частоты ν . Если E рассматривается как непрерывно делимая величина, то это распределение возможно бесконечным числом способов. Тем не менее рассмотрим – и это самый важный пункт всего расчета – E как состоящую из определенного числа равных частей и используем константу $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ (эрг · сек). Эта константа, помноженная на частоту ν резонатора, даст энергию элемента ϵ в эргах, и, разделив E на ϵ , мы

получим число P элементов энергии, которые должны быть распределены по N резонаторам” [48].

Далее Планк определяет “комплексию” (выражение, как он подчеркивает, “использованное Больцманом для сходного понятия”) как особое множество чисел, которое фиксирует число элементов ϵ , присущее различным резонаторам множества N . Полное число всех возможных комплексий есть R . Для того чтобы найти равновесное распределение, необходимо определить максимум R или $\log R$, варьируя энергии по разным частотам. Непосредственные вычисления показывают, что энтропия ($\log R$) будет максимальна, если $U\nu = h\nu/\exp(h\nu/kT) - 1$. Соответствующее распределение для поля $u_\nu = (8\pi\nu^2/c^3) U_\nu$.

Важно отметить, что как в оригинальных статьях рассмотренного периода, так и, в особенно явном виде, в “Лекциях по тепловому излучению” [49] планковская теория излучения несовместима с квантованием энергии резонаторов. Эта теория только требует фиксации размеров малых интервалов, на которые в целях комбинаторных расчетов разделена энергия континуума. В теории Планка испускание и поглощение излучения резонаторами описывается уравнениями Максвелла. Планк действительно часто использует выражения типа $U_N = Ph\nu$. Но U_N — это общая энергия N резонаторов. Сведение ее к целым произведениям $h\nu$ не налагает сходных ограничений на энергию каждого *индивидуального* резонатора, которая может изменяться непрерывно.

Итак, несмотря на то что Планк часто обращался к результатам экспериментов, значение эксперимента не следует преувеличивать. Попыты по излучению черного тела играли роль фактора, который заставлял Планка использовать статистику в возрастающих степенях. Если бы “неудобных” экспериментальных данных не было, Планк едва ли использовал бы больцмановские комбинаторные методы, поскольку первоначально он относился к ним с большой настороженностью и предубежденностью. Действительно, использование их было основано на принятии специальных и сомнительных гипотез, которые Планк, будучи поклонником классической термодинамики, старался избежать.

Поэтому мы не можем утверждать, что планковский закон распределения был обобщением опытных данных. Напротив, путь Планка к этому закону представлял собой путь “сверху вниз”. Несомненно, что Планк был вынужден учитывать опытные данные, но они заставляли его не “заключать из явлений”, а наоборот, использовать больше теории. Как один из первых “чистых” теоретиков в истории физики, как теоретик par excellence, лидер германской теоретической физики Планк

не может рассматриваться в качестве человека, нашедшего в результате счастливого случая нечто, значение чего он сам не смог оценить. Будучи теоретиком-профессионалом, он осознавал и важность самой проблемы, и необходимость ее рассмотрения в *интертеоретическом* контексте. Он прекрасно понимал, что один из корней этой проблемы – глубокое противоречие между основными принципами механики, статистики, электродинамики и термодинамики [50]. И еще более явно в “Лекциях по тепловому излучению” Планк использует те же аргументы, что и Эйнштейн в своей статье 1905 г. по фотоэффекту [51].

Именно факт возникновения ранней квантовой теории из столкновения между классической электродинамикой и статистической механикой был отмечен одним из ведущих российских теоретиков начала XX в.: “...Особенно любопытно, что идея квантов должна была зародиться пятьдесят лет тому назад, когда была создана кинетическая теория вещества, поскольку эта идея неразрывно связана с молекулярной структурой материи и является особым отражением этой структуры” [52].

Работы В.А.Михельсона, В.Вина, Л.Больцмана, М.Планка и А.Эйнштейна были этапами проникновения методов и понятий статистики в область теории излучения, этапами рассмотрения электромагнитного поля со статистической точки зрения [53]. В этом смысле мы можем говорить о синтетической программе Больцмана – Вина – Планка, программе согласования электродинамики и статистической механики [54]. Последовательные версии этой программы характеризуются *ad hoc* и не *ad hoc* реакциями на экспериментальные результаты. Данная программа обеспечивала постоянный эмпирически прогрессивный сдвиг решаемых проблем по отношению к своей сопернице – редукционистской программе Дж.Джинса. Первая идеальная модель рассматриваемой программы была представлена в работе В.Михельсона, пытавшегося по-своему объяснить аналогию между формой экспериментальной кривой, описывавшей зависимость энергии чернотельного излучения от частоты, и кривой максвелловского распределения в теории газов. Несмотря на то что первая грубая михельсоновская модель была впоследствии доработана В.Вином, гипотезы, которые обеспечили сдвиг от первоначальной версии программы к ее второму варианту, оказались настолько *ad hoc*, что фактически первый по-настоящему теоретический вывод спектра чернотельного излучения в высокочастотном пределе дал только М.Планк.

Тем не менее согласование этих теорий на уровне гибридных объектов в будущем привело к изменениям в их основаниях. В частнос-

ти, трудности подсчета распределения энергии между осцилляторами привели к квантованию энергии каждого осциллятора.

Неопровержимое твердое ядро программы состояло из трех конструктивно независимых базисных теорий: электродинамики, термодинамики и статистической механики. Позитивная эвристика, в противоположность программе Джинса, состояла в предположении, что все электромагнитное излучение в некоторых аспектах обладает корпускулярными свойствами и поэтому может быть описано законами и принципами статистической механики. Защитный пояс вспомогательных гипотез был образован системой моделей M_1, M_2, \dots, M_k , дававших все более и более точные “картины реальности”. Некоторые из выдвинутых в рамках этой программы теорий действительно были теориями ad hoc, но они были впоследствии заменены лучшими, исправлявшими их недостатки. Например, как отмечала Е.А.Мамчур, некоторые теории Планка были теориями ad hoc, да и сам его закон распределения был сначала получен методом ad hoc, но был достаточно быстро должным образом скорректирован.

В противоположность программе Джинса, квантовая синтетическая программа обеспечила создание гибридных объектов, сконструированных из базисных объектов электродинамики, термодинамики и статистической механики. Все модели, сконструированные в рамках синтетической программы, были гибридными, хотя и в разных степенях. Они становились все более и более гибридными под влиянием экспериментов.

* * *

Таким образом, диалектика взаимодействия старых парадигм оказывается важной для их смены в процессе развития физики. Тем не менее намерения автора данной статьи далеки от того, чтобы выдвинуть еще одну интерналистскую модель, подчеркивающую мистическую роль теоретической автономии в физике. Наоборот, самое общее объяснение причин перехода от старой парадигмы к новой должно, как нам представляется, даваться в социологических терминах, предложенных А.Пиккерингом и Ю.Хабермасом.

История теоретической физики может рассматриваться как история взаимодействия различных исследовательских традиций. Эти традиции рождаются, взаимодействуют и исчезают. Выживают только те из них, которые ухитряются поддерживать друг друга. В частности, мир доэйнштейновской физики был концептуально, организационно

и ценностно расколот. Он был расщеплен на три основные традиции, относившиеся к максвелловской электродинамике, классической термодинамике и ньютоновской механике (включая статистическую механику). Эти традиции развивались независимо друг от друга; при этом результаты, полученные в рамках одной парадигмы, не оказывали практически никакого влияния на развитие другой парадигмы. Создание специальной теории относительности и ранней квантовой теории способствовало не только объединению картин мира и атематических формализмов, но и социальной организации практики.

Поэтому современная физика началась с согласования Эйнштейном и Планком электродинамики, термодинамики и механики в 1905 г. и создания СТО и ранней квантовой теории, а затем ее развитие было продолжено согласованием специальной теории относительности с ньютоновской теорией гравитации и созданием ОТО. По крайней мере на первых порах смена теорий должна описываться не в веберовских терминах вытеснения целерациональным действием всех остальных видов социального действия, но в терминах хабермасовской коммуникативной рациональности, поощряющей установление взаимопонимания между представителями различных научных сообществ.

Примечания

1. См.: *Кемпбелл Н.Р.* Современная электрическая теория. – СПб.: Образование, 1912.

2. См.: *Abiko S.* On the chemico-thermal origins of special relativity // *Histor. Studies in the Phys. and Biol. Sciences.* – 1990. – V. 22, p. 1. – P. 1–24; *Feuer L.S.* Einstein and the generations of science. – N.Y.: Basic Books. Inc., 1974; *Goldberg S.* The Lorentz theory of electrons and Einstein's theory of relativity // *Amer. Jour. of Physics.* – 1969. – V. 37. – P. 982–994; *Hirose T.* The ether problem, the mechanistic world view and the origins of the theory of relativity // *Histor. Studies in the Phys. Sciences.* – 1976. – V. 7. – P. 3–82; *Holton G.* Einstein, Michelson and the 'crucial' experiment // *Isis.* – 1969. – V. 60. – P. 133–197; *McCormach R.* H.A.Lorentz and the electromagnetic view of nature // *Isis.* – 1970. – V. 61. – P. 459–497; *Miller A.I.* The SR theory: Einstein's response to the physics of 1905 // *Albert Einstein: Historical and Cultural Perspectives* / Eds. G.Holton, Y.Elkana. – Princeton, New Jersey. – 1982. – P. 3–26; и др.

3. Подробнее см.: *Zahar E.* Did Einstein's programme supersede Lorentz's? // *The British Jour. for the Philos. of Science.* – 1973. – V. 24. – P. 95–123, 226–262.

4. См. также: *Zahar E.* Einstein's debt to Lorentz: a reply to Feyerabend and Miller // *The British Jour. for the Philos. of Science.* – 1978. – V. 29. – P. 50–54.

5. См.: *Einstein A.* Über eine methode zur Bestimmung des verhältnisses der transversalen und longitudinalen Masse des Elektrons // *Annalen der Physik.* – 1906. – Bd. 20. – S. 583–586.

6. См.: *Einstein A.* Über eine die Erzeugung und verwandlung des Lichtes betreffenden hewristischen Lesictpunkt // *Annalen der Physik.* – 1905. – Bd. 17. – S. 132–148.
7. См.: *Einstein A.* Über die von der molekularkinetischen Theorie der Warmegefordete Bewegung von in ruhenden Flussigkeiten suspendierten Teilschen // *Annalen der Physik.* – 1905. – Bd. 17. – S. 549–560.
8. См.: *Einstein A.* Zur Elektrodynamik bewegter Korper // *Annalen der Physik.* – 1905. – Bd. 17. – S. 891–921.
9. См.: *Einstein A.* Über die Entwicklung unserer Anschauungen uber das Wesen und die Konstitution der Strahlung // *Physikalische Zeitschrift.* – 1909. – Bd. 10. – S. 817–825.
10. *Ibid.* – S. 482.
11. *Ibid.*
12. См.: Albert Einstein / Mileva Maric: The love letters / Ed., introd. J.Renn, R.Schulmann. – Princeton, New Jersey: Princeton Univ. Press, 1992. – P. 33.
13. См., например: The collected papers of Albert Einstein. V. 5: The Swiss years: Correspondence, 1902–1914 / Ed. M.J.Klein e.a. – Princeton: Princeton Univ. Press, 1993.
14. *Ibid.* – P. 20.
15. См.: *Einstein A.* Über eine die Erzeugung...
16. См.: *Ter Haar D.* The old quantum theory. – Oxford: Pergamon Press, 1967.
17. Подробнее см.: *Нугаев Р.М.* Реконструкция процесса смены фундаментальных научных теорий. – Казань : Изд-во Казанск. гос. ун-та, 1989.
18. Подробнее см.: *Stachel J.* [Introduction] // *Einstein: The formative years, 1879–1909* / Eds. D.Howard, J.Stachel. – Boston; Berlin: Birkhauser, 2000.
19. Подробнее см.: *Renn J.* Einstein's controversy with Drude and the origin of statistical mechanics: A new glimpse from the 'Love Letters' // *Einstein: The Formative Years, 1879–1909.* – P. 107–157.
20. Подробнее см.: *Нугаев Р.М.* Реконструкция процесса смены фундаментальных научных теорий.
21. Подробнее см.: *Степин В.С.* Становление научной теории. – Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1976.
22. См.: *Einstein A.* Zum gegenwartigen Stand des Strahlungsproblem // *Physikalische Zeitschrift.* – 1909. – Bd. 10. – S. 198.
23. *Ibid.* – S. 199.
24. *Einstein A.* Über eine die Erzeugung...
25. См.: *Einstein A.* Principe de relativit  et ses consequences dans la physique moderne // *Archives des Sciences Phys. et Natur.* – 1910. – V. 29. – P. 125–144.
26. *Einstein A.* Über die Entwicklung unserer Anschauungen uber das Wesen und die Konstitution der Strahlung // *Physikalische Zeitschrift.* – 1909. – Bd. 10. – S. 817–825.
27. Цит. по: *Pais A.* Einstein and the quantum theory // *Rev. of Modern Phys.* – 1979. – V. 51. – P. 863–914.
28. *Ibid.* – P. 863–914.
29. *Kunz J.* On the electromagnetic theory of emission of light // *Amer. Journ. of Science.* – 1910. – V. – P. 314.
30. Цит. по: *Klein M.J.* No firm foundations: Einstein and the early quantum theory // *Some strangeness in the proportion.* – N.Y., 1980. – P. 193.
31. Подробнее см.: *Illy J.* Einstein teaches Lorentz, Lorentz teaches Einstein. – Budapest, 1981.

32. См.: *Einstein A.* Über die von der molekularkinetischen...
33. *Lorentz H.A.* Le partage de l'énergie entre la matière pondérable et l'éther // *Atti del 4 Congresso Internazionale dei Matematici.* Roma, 6–11 Aprile 1908. – Rome, 1909. – V. 1. – P. 160.
34. *Bohr N.* On the constitution of atoms and molecules // *Philos. Mag.* – 1913. – V. 26. – P. 2.
35. *Campbell N.R.* The aether // *Philos. Mag.* – 1910. – V. 24. – P. 181.
36. *Ibid.* – P. 189.
37. См.: *Kunz J.* On the electromagnetic theory of emission of light. – P. 313, 314.
38. *Lewis G.N.* A revision of the fundamental laws of matter and energy // *Philos. Mag.* – 1908. – V. 13. – P. 708.
39. См., например: *Norton J.* The determination of theory by evidence: The case for quantum discontinuity, 1900–1915 // *Synthese.* – 1993. – V. 97. – P. 1–31.
40. См., например: *Boyer T.* Random electrodynamics: The theory of classical electrodynamics with classical electromagnetic zero-point radiation // *Phys. Rev.* – 1975. – V. 11, No 4. – P. 790–808; *Id.* Derivation of the black-body radiation spectrum from the equivalence principle in classical physics with classical electromagnetic zero-point radiation // *Phys. Rev. D.* – 1984. – V. 29, No 6. – P. 1096–1097.
41. Закон Рэлея – Джинса описывает, как известно, спектр распределения энергии чернотельного излучения в классической физике: $u(\nu, T) = 8\pi\nu^2 kT/c^3$, где ν – частота излучения, T – температура черного тела, k – постоянная Больцмана, c – скорость света. Из этого закона следуют два определенных вывода: а) плотность энергии излучения пропорциональна квадрату частоты; б) общая энергия всего излучения бесконечна.
42. См.: *Planck M.* Über irreversible Strahlungsvorgänge: Erste Mitteilung // *Berl. Ber.* – 1897. – S. 57–68; *Id.* Über irreversible Strahlungsvorgänge: Zweite Mitteilung // *Ibid.* – S. 715–717; *Id.* Über irreversible Strahlungsvorgänge: Dritte Mitteilung // *Ibid.* – S. 1122–1145; *Id.* Über irreversible Strahlungsvorgänge: Vierte Mitteilung // *Ibid.* – S. 57–68; *Id.* Über irreversible Strahlungsvorgänge: Fünfte Mitteilung (Schluss) // *Ibid.* – 1899. – S. 440–480.
43. См.: *Planck M.* Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum // *Verh. D. D. Phys. Ges.* – 1900. – Bd. 2. – S. 237–245.
44. См.: *Dugas R.* La théorie physique au sens de Boltzmann et ses prolongements modernes. – Paris: Editions de Griffon, 1959; *Бройль Л., де.* Таинственная постоянная h – великое открытие Макса Планка // *По тропам науки.* – М.: Иностр. лит., 1962. – С. 139.
45. *Kuhn T.S.* Black-body theory and quantum discontinuity, 1894–1912. – Oxford; New York, 1978. – P. 78.
46. *Planck M.* Max Planck and Robert William Wood // *Brief 1931: Sources for History of Quantum Physics.* – 1931. – Mf. 66,7x.
47. *Planck M.* Acht Vorlesungen über theoretische Physik. – Leipzig: Hirzel, 1910. – S. 34.
48. *Planck M.* Zur Theorie des Gesetzes... – S. 246. См. также комментарии в работе: *Ter Haar D.* The old quantum theory. – P. 83.
49. См.: *Planck M.* Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung. – Leipzig: J.A.Barth, 1906.
50. См.: *Planck M.* Acht Vorlesungen über theoretische Physik. – S. 616.

51. Подробнее см.: *Planck M.* Vorlesungen uber die Theorie der Warmestrahlung. – S. 105.
52. *Гольдгаммер Д.А.* Новые идеи в современной физике // Физическое обозрение. – 1911. – Т. 12, № 1–2. – С. 1–35, 76–155.
53. См.: *Баклаев В.Г.* Квантовая гипотеза Л.Больцмана и М.Планка // Вопросы истории естествознания и техники. – 1957. – Т. 4. – С. 167, 168.
54. Подробнее о синтетической и редукционистских программах см.: *Нугаев Р.М.* Реконструкция процесса смены фундаментальных научных теорий.

Институт социально-экономических и
правовых наук АН Татарстана, Казань

Nugaiev, R.M. Einstein's revolution: making of communicative rationality.

The objective of the paper is to show a heuristic effectiveness of the model of change of developed scientific theories, the transition from classical physics to quantum relativistic one in the beginning of the 20th century is taken as an illustration. This model was offered within the communicative rationality conception. The author states that special theory of relativity and the so-called «early quantum theory» were developed within one and the same program of reconciliation of statistical mechanics, thermodynamics and Maxwell's electrodynamics. It makes possible to give a rather simple explanation to a well-known fact in the history of science that relativistic and quantum revolutions took place virtually simultaneously. In the author's view, the «cause» for both revolutions was the conflict between three paradigms of classical physics. Einstein's program was better than those which competed against it not because it could explain more «facts» and not because it was mathematically more perfect. It overpowered its competitors chiefly because it originated a *fond* for mutual communication (according to J.Habermas's conception) of the three main scientific communities in classical physics.