

не только движением светил по отношению к наблюдателю, но и изменениями, происходящими в среде, которая разделяет спектроскоп и исследуемый источник света. Четко выразив свое отношение как к самому принципу Допплера — Физо, так и к его астрофизическим приложениям, Михельсон отмечает, что принцип Допплера сам по себе носит чисто кинематический характер и, следовательно, не вызывает никаких сомнений, однако в числе предположений, на которых основано его применение, имеются допущения, в значительной степени произвольные и требующие опытной проверки.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ В ТРАКТОВКЕ ЛОРЕНЦА И ПУАНКАРЕ

Лоренц и Пуанкаре были наиболее близки к основным идеям специальной теории относительности, сформулированным в окончательной форме Эйнштейном независимо от них. Пути, по которым они шли к теории относительности, были во многом идентичны. Но в творчестве Лоренца многочисленные проблемы электродинамики движущихся тел занимали особо видное место.

Во введении к своей статье «О динамике электронов» (1906) Пуанкаре ссылался на работу Лоренца «Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света», опубликованной 27 мая 1904 г. в «Известиях Амстердамской академии», и писал: «Важность вопроса побудила меня снова заняться им: результаты, полученные мною, согласуются во всех наиболее важных пунктах с теми, которые получил Лоренц; я стремился только дополнить и видоизменить их в некоторых деталях; некоторые имеющиеся расхождения, как увидим дальше, не играют существенной роли» [9, стр. 52].

Пуанкаре далее указывает, что Ланжевен (а до него Бухерер) пытался видоизменить идею Лоренца. В то время как у Лоренца движущийся электрон принимает форму сплюснутого эллипсоида вращения, две оси которого остаются неизменными, у Ланжевена остается постоянным объем эллипсоида. Несмотря на подкупающее преимущество теории Ланжевена, вводящей только электромагнитные силы и силы связи, она, как показал Лоренц, несовместима с постулатом относительности.

Фохт уже в 1887 г. был близок к формальной стороне преобразований Лоренца, но весьма далек от их физической интерпретации. Он записывает уравнения колебаний упругой несжимаемой среды и рассматривает такие преобразования координат и времени, которые оставляют указанные уравнения инвариантными. Близко к теории Лоренца подошел Лармор; весьма интересна и своеобразна была эволюция Ланжевена. Однако

лишь Лоренц в 1904 г. пришел к формулировке требования инвариантности уравнений поля по отношению к прямолинейному и равномерному движению.

Интересы Пуанкаре к электродинамике движущихся сред не были столь стабильны, как у Лоренца, но в круг вопросов, глубоко интересовавших Пуанкаре, входили также проблемы пространства и времени и ряд динамических проблем, весьма существенных для построения релятивистской теории.

Уже в 1892—1893 гг. Лоренц высказал гипотезу сокращения продольных размеров тел при их движении, призванную объяснить отрицательный результат опытов, ставившихся для обнаружения эффектов второго порядка. Фицджеральд сообщил Лоренцу, что он уже давно излагает эту гипотезу в своих лекциях. В дальнейшем Лоренц указал, что в литературе он нашел упоминание о гипотезе сокращения только в статье Лоджа.

Гипотеза сокращения состояла в том, что размеры всех тел, движущихся со скоростью v по отношению к эфиру, уменьшаются так, что

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Лоренц стремился придать подобному сокращению смысл реального сокращения. В состоянии покоя система зарядов, составляющих тело и определяющих его размеры, находится в некотором равновесии. При движении же тела возникают магнитные поля, меняются взаимодействия зарядов, силы сцепления, определяющие собой условия равновесия атомов движущегося тела, и равновесие нарушается. При установлении нового равновесия меняются размеры тел. Однако одни лишь электрические силы не дают устойчивого равновесия и, кроме того, частицы всегда находятся в движении. Вскоре это объяснение не стало удовлетворять и самого Лоренца. В 1904 г. Лоренц исходит уже из уравнений электронной теории:

$$\operatorname{div} \mathbf{d} = \rho, \quad \operatorname{rot} \mathbf{h} = \frac{1}{c} (\dot{\mathbf{d}} + \rho \mathbf{v}),$$

$$\operatorname{div} \mathbf{h} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{d} = -\frac{1}{c} \dot{\mathbf{h}}, \quad \mathbf{f} = \mathbf{d} + \frac{1}{c} [\mathbf{v} \mathbf{h}];$$

(здесь \mathbf{d} — диэлектрическое смещение; \mathbf{h} — напряженность магнитного поля; ρ — плотность электрического заряда; \mathbf{v} — скорость заряда; \mathbf{f} — сила); он стремится показать с помощью определенных основных допущений, что многие электромагнитные явления не зависят от движения системы.

Лоренц принимает, что система как целое движется по направлению оси x с постоянной скоростью ω . Обозначим скорость, которую сверх того имеет какая-нибудь точка электрона, через \mathbf{u} , тогда $v_x = \omega + u_x$, $v_y = u_y$, $v_z = u_z$. Если уравнения элект-

ронной теории отнести к осям движущейся системы координат, то получим видоизмененную систему уравнений.

Лоренц преобразует систему уравнений, вводя в качестве новых переменных

$$x' = klx, \quad y' = ly, \quad z' = lz, \quad \text{где } k^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2}.$$

Затем он выбирает подходящие выражения для напряженностей электрического и магнитного полей в движущейся (штрихованной) системе отсчета и определяет два новых вектора \mathbf{d}' и \mathbf{h}' .

Путем несложных преобразований уравнения можно представить в виде

$$\operatorname{div}' \mathbf{d}' = \left(1 - \frac{vu'_x}{c^2}\right) \rho', \quad \operatorname{div}' \mathbf{h}' = 0,$$

$$\operatorname{rot}' \mathbf{h}' = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial \mathbf{d}'}{\partial t'} + \rho' \mathbf{u}' \right), \quad \operatorname{rot}' \mathbf{d}' = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{h}'}{\partial t'}.$$

Дифференцирование по нештрихованным переменным заменяется дифференцированием по штрихованным.

В 1912 г. Лоренц писал: «Можно заметить, что в этой статье мне не удалось в полной мере получить формулы преобразования теории относительности Эйнштейна..., вследствие чего мне не удалось уничтожить член $-\omega u'_x/c^2$ из первой формулы и, таким образом, привести уравнения точно к виду, справедливому для покоящейся системы. С этим обстоятельством связана беспомощность некоторых дальнейших рассуждений в этой работе. Заслуга Эйнштейна состоит в том, что он первый высказал принцип относительности в виде всеобщего строго и точно действующего закона» [10].

Однако исторически существенным вкладом Лоренца в создание теории относительности явилась идея инвариантности величин или выражений при переходе от одной инерциальной системы к другой. Лоренц много внимания уделил отысканию подобных инвариантных выражений.

Ланжевен в статье «О невозможности обнаружить поступательное движение Земли с помощью физических опытов», опубликованной в 1905 г., очень выразительно охарактеризовал заслуги Лоренца. Он писал: «Лоренц показал недавно, дополняя результаты, полученные ранее им и Лармором, что электронная теория полностью предвидит и притом во всех порядках приближения невозможность обнаружить при помощи статических измерений или наблюдений положений равновесия, либо интерференционных полос в оптике, движение всей системы электронов, если сам наблюдатель увлекаем

вместе с нею» [11]. В дальнейшем многими указывалось, что наряду с физическими исследованиями причин сокращения Лоренц сделал математическое открытие, показав, что уравнения Максвелла — Лоренца остаются инвариантными относительно специального преобразования координат, времени и полей.

В 1904 г. на конгрессе в Сент-Луисе Пуанкаре исходил из принципа относительности и высказывался также за то, что не могут существовать скорости, превосходящие скорость света. В статье «О динамике электронов» (1905) Пуанкаре начинает изложение с характеристики тех трудностей, с которыми столкнулась электродинамика движущихся сред. Он указывает на то, что с первого взгляда кажется, что абберация света и связанные с нею явления дают средство для определения движения Земли по отношению к эфиру. Однако не только опыты, где принимаются в расчет только члены первого порядка относительно величины абберации, но и опыты, в которых становились заметными члены, зависящие от квадрата абберации, не позволили обнаружить движение Земли. «Эта невозможность,— пишет Пуанкаре,— показать опытным путем абсолютное движение Земли представляет, по-видимому, общий закон природы; мы, естественно, приходим к тому, чтобы принять этот закон, который мы назовем *постулатом относительности*, и принять без оговорок» [9, стр. 51—52]. Однако он в том же абзаце в менее утвердительной форме пишет: «Все равно, будет ли позднее этот постулат, до сих пор согласующийся с опытом, подтвержден или опровергнут более точными измерениями, сейчас во всяком случае представляется интересным посмотреть, какие следствия могут быть из него выведены» [9, стр. 51—52].

Оценивая вклад Пуанкаре в специальную теорию относительности, Паули отмечал, что: 1) в работе Пуанкаре были заполнены формальные пробелы, оставшиеся у Лоренца; 2) принцип относительности был высказан Пуанкаре в качестве всеобщего и строгого положения; 3) названия: «преобразования Лоренца» и «группа Лоренца» впервые фигурируют у Пуанкаре; 4) неизменность перпендикулярных к направлению движения размеров тела совершенно естественно вытекает у Пуанкаре из требования, чтобы преобразования, с помощью которых осуществляется переход от неподвижной системы к движущейся, образовывали группу, содержащую в качестве подгруппы обычные вращения осей координат; 5) Пуанкаре исправил лоренцовы формулы преобразования плотности заряда и скорости и таким образом достиг полной ковариантности уравнений электронной теории.

Паули считает, что в качестве предшественника Минковского надо упомянуть Пуанкаре, который ввел уже мнимую координату и часто объединял вместе величины, которые сейчас называют компонентами 4-вектора. Паули не подвергает анализу философские взгляды Пуанкаре.

Роль Пуанкаре в установлении специальной теории относительности часто недооценивают. Причины недооценки его вклада в создание теории относительности Л. де Бройль и О. А. Старосельская-Никитина усматривают в философском конвенционализме Пуанкаре. Д. Д. Иваненко считает причинами забвения роли Пуанкаре: 1) факт публикации статьи в практически неизвестном физикам, но крупном итальянском математическом журнале; 2) то, что работа Эйнштейна была подхвачена многочисленной армией немецких физиков-теоретиков; 3) неуверенное отношение самого Пуанкаре к своим результатам.

Заманчивой в историческом отношении представляется точка зрения Б. Г. Кузнецова: «Формализм четырехмерных преобразований, изложенных в статье Пуанкаре,— пишет Б. Г. Кузнецов,— опередил математические построения Эйнштейна и даже Минковского. Но в первую очередь он опередил физические построения самого Пуанкаре» [12].

Групповые свойства группы Лоренца, рассмотренные Пуанкаре, нельзя рассматривать как нечто имеющее чисто математическое значение. «Лоренцовы преобразования,— пишет Мандельштам,— образуют группу. Я утверждаю, что если бы этого не было, то получились бы большие неприятности, получилось бы так, что мы не знали бы, с чего начать при физическом подходе. Он указывает, что хотя в физике и не требовали группового характера от преобразований Лоренца, но без этого сомнительно, можно ли было построить какую-нибудь последовательную систему» [7, стр. 280].

При помощи преобразований Лоренца координаты в одной движущейся системе отсчета выражаются через координаты в другой системе, относительно которой движется первая. При наличии трех координатных систем зависимость координаты x'' от координаты x можно найти двумя путями. Находят зависимость x от x' , зависимость x' от x'' и затем зависимость x от x'' .

Можно пойти другим путем: найти сразу x'' как функцию x . Если бы преобразования не давали группу, то эти пути могли привести к различным результатам. «Значит, все наше построение было бы непоследовательным, нам запрещалось бы сравнивать сначала x и x' , а затем x' и x'' . Не было бы транзитивных соотношений, которые позволяют нам строить всю нашу концепцию, и эта концепция обладала бы провалом, который, быть может, и можно было бы как-то исправить, но совершенно не видно как» [7, стр. 284].

В теории относительности понятие группы преобразования было введено Пуанкаре. Параметром группы Лоренца является скорость, и определенному значению скорости всегда соответствует определенный элемент непрерывной группы. Преобразования Лоренца в самом общем виде имеют десять независимых параметров, образующих десятипараметрическую группу. Одно-

родные преобразования Лоренца имеют шесть независимых параметров, а преобразования Лоренца в специальном случае образуют группу с одним параметром — скоростью.

Из требования, чтобы преобразования, с помощью которых осуществляется переход от неподвижной системы к системе движущейся, образовывали такую группу, которая содержит в качестве подгруппы трехмерные вращения системы координат, Пуанкаре вывел неизменность размеров тел в направлении, перпендикулярном движению.

В том виде, в каком преобразования Лоренца записывались до Пуанкаре, полная ковариантность уравнений электронной теории не достигалась. Исправив лоренцовы формулы преобразования плотности заряда и скорости, Пуанкаре достиг полной ковариантности уравнений электронной теории.

Связь инвариантности и групповых свойств основывается на физических принципах. Преобразования Лоренца были получены из двух физических постулатов. Математически эти преобразования получаются из требования инвариантности выражения для ds^2 .

Можно сформулировать чисто математически обратную задачу. Дана совокупность линейных однородных преобразований с одним параметром; при каких условиях такая совокупность образует однопараметрическую группу?

Пуанкаре рассматривал группу преобразований, оставляющих ковариантным уравнение $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0$, и требовал помимо этого, чтобы эта группа содержала в качестве подгруппы: а) однопараметрическую группу перемещений параллельно оси x и б) обычные трехмерные вращения системы координат.

Минковский сформулировал так называемый мировой постулат как инвариантность всех законов природы по отношению к линейным преобразованиям, оставляющим инвариантным интервал ds^2 .

Полагая $x_4 = ict$, получаем формальную аналогию группе ортогональных преобразований декартовых координат в трехмерном евклидовом пространстве. Н. А. Умов (1910) усматривал некоторую произвольность в допущениях, к которым прибегал Лоренц, предлагая преобразования координат при переходе от одной системы к другой. «Вывод его, — писал Н. А. Умов, — основывается на некоторой совокупности допущений и рассуждений, которые не вытекают сами собой из одного единственного положения, но, как кажется, связаны между собой остроумием исследователя. По сравнению с простотой преобразования вывод его представляется слишком громоздким. Кроме того, этот вывод не дает никаких опорных пунктов для обсуждения положения, занимаемого лоренцовым преобразованием в ряде других возможных преобразований, и не показывает путей, которые могли бы повести к новым преобразованиям.

Обычно употребляемые рассуждения пригодны скорее для разъяснения лоренцова преобразования, чем для вывода его» [13].

В речи, произнесенной 1 мая 1915 г. [14], Н. Е. Жуковский высоко оценил работу Н. А. Умова «Условия инвариантности волнового уравнения». Он отметил, что аналогично тому, как неевклидова геометрия и геометрия многих измерений опираются на инвариантность обобщенного представления об элементе дуги, по Н. А. Умову, математическое содержание принципа относительности заключается в инвариантности (волнового) уравнения распространения света.

В 1953 г. А. Д. Александров и В. В. Овчинникова показали, что для вывода общего преобразования Лоренца достаточно принять лишь постулат постоянства скорости света и евклидовости пространства без привлечения принципа относительности.

Г. Арзелье рассмотрел следствия, к которым приводит формальное применение преобразований Лоренца для относительного движения двух инерциальных систем со скоростью, превышающей скорость света. Вопросы линейности лоренцовых преобразований рассматривал Брелль. Розен исследовал общие преобразования Лоренца в форме кватернионов. Динглер и Штек рассматривали преобразования Лоренца в рамках механики, не прибегая при выводе к электродинамическим предположениям. Сен исследовал, к каким следствиям приводят постулаты, лежащие в основе преобразований Лоренца, если их рассматривать не в совокупности, а в отдельности. Много серьезных исследований посвящено математическому разбору свойств группы Лоренца (В. А. Фок и др.) [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. К. Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М., 1954.
- 1а. К. Д. Синельников. О философских вопросах современной физики.— В кн. «Философские вопросы современной физики». Киев, 1956, стр. 9.
2. А. Эйнштейн, Л. Инфельд. Эволюция физики. М., 1958, стр. 152.
3. М. Лауэ. История физики. М., 1956, стр. 64.
4. Г. А. Лоренц. Теория электронов. М., 1956.
5. А. Эйнхенвальд. Избранные работы. М., 1956.
6. Ф. Розенбергер. История физики, ч III, вып. 2. М — Л, 1936, стр. 382.
7. Л. И. Мандельштам. Соч., т. V. М., 1950.
8. А. Belopolsky. Astr. Nachr., 1894, 137, 33; Astrophys. J., 1901, 13, 15; Bull. de l'Acad. imper. des Sciences de St.-Petersb., 1900, 13, 461.
9. А. Пуанкаре. О динамике электронов.— В сб. «Принцип относительности». М.—Л., 1935.
10. Г. А. Лоренц. Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света.— В сб. «Принцип относительности». М.—Л., 1935, стр. 22—23.
11. П. Ланжевен. Избранные труды. М., 1960, стр. 448.
12. Б. Г. Кузнецов. Основные идеи специальной теории относительности.— В сб. «Очерки развития основных физических идей». М., 1958, стр. 285.
13. Н. А. Умов. Избранные сочинения. М.—Л., 1950, стр. 492.
14. Н. Е. Жуковский. Н. А. Умов как математик. Соч., т. 7, стр. 284.
15. В. А. Фок. Теория пространства, времени и тяготения. М., 1955.