

В отношении дискретности и непрерывности пространственно-временного континуума специальная теория относительности не выходит за рамки классической физики.

В статье «Открытие Планка и основные философские вопросы учения об атоме» Гейзенберг дал общую характеристику структуры пространства и времени в специальной теории относительности и границ применимости этой структуры. «Открытая в специальной теории относительности структура пространства и времени, — пишет В. Гейзенберг, — может быть коротко описана следующим образом. Мы можем охватить словом «прошедшее» все те события, в отношении которых мы могли — во всяком случае принципиально — нечто испытать; под словом «будущее» — все другие события, на которые мы — по крайней мере принципиально — можем еще воздействовать. В нашем наглядном представлении обе эти области событий отделены бесконечно коротким промежутком времени, который мы назовем «настоящим моментом». Но из эйнштейновской теории мы знаем, что эта область настоящего конечна, что она тем дольше длится, чем дальше удалено от нас место события. Это происходит потому, что действия не могут распространяться со скоростью, большей скорости света. Таким образом, имеется резкая пространственно-временная граница между событиями, в отношении которых мы можем нечто испытать, и теми, в отношении которых мы больше не можем ничего испытать, и другая граница между событиями, на которые мы еще можем воздействовать, и событиями, на которые мы более воздействовать не можем» [20].

Гейзенберг указывает, что существование столь резкой границы плохо согласуется с раскрытой квантовой теорией структурой физических процессов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Вопрос о системе отсчета в физике приобрел особую актуальность в конце XIX и начале XX в., хотя эта проблема и имеет многовековую историю. Лауэ отмечает, что проблема системы отсчета прошла три стадии развития: геометрическую, простирающуюся от глубокой древности до XVII в.; динамическую, которая после победы волновой теории распространилась на всю физику; релятивистскую.

Многочисленные дискуссии об аберрации и доплер-эффекте в физике XIX в. не привели к решению вопроса о том, существует ли несколько равноправных с точки зрения оптики систем отсчета.

Существование привилегированной системы можно было бы доказать, лишь обнаружив влияние какой-либо общей скорости

на все участвующие в движении тела. Влияние движения Земли на оптические и электрические явления должно было бы проявляться в изменении некоторых из измеряемых величин.

Наблюдения должны были решить вопрос о том, протекают земные оптические и электромагнитные опыты в эфире, полностью увлекаемом при движении Земли, или же в эфире, отстающем от Земли при ее годовом движении вокруг Солнца (неувлекаемом). Существование эфира со времени Френеля (начало XIX в.) почти не вызывало сомнений. В 1839 г. Жак Бабине исследовал влияние движения Земли на явления интерференции, не получив положительных результатов. В оптических исследованиях Физо, Клинкерфуса, Хага, Кетлера, Маскара, Редея, как и в электрических исследованиях Рентгена, де Кудра, Трутона и др., не было обнаружено никакого влияния движения Земли на наблюдавшиеся явления. В дальнейшем оказалось, что интерференционные, дифракционные и поляризационные явления могут ответить на вопрос об увлечении эфира лишь при наблюдении величин второго порядка относительно v/c . Тщетность попыток обнаружить эффект первого порядка относительно v/c в области оптических или электромагнитных явлений позволила высказать принцип относительности первого порядка, не противоречащий ни одному из положений электродинамики; он может быть сохранен как при гипотезах увлечения, так и при гипотезах неподвижного эфира.

При измерении скорости света можно замкнуть световой путь и воспользоваться лишь одними часами; однако при этом разность времен прохождения лучом некоторого расстояния в прямом и обратном направлениях будет зависеть только от членов второго порядка. Можно воспользоваться двумя часами, находящимися на значительном расстоянии. Этой схеме, как указал Максвелл в 1878 г., соответствует известный способ определения скорости света по затмениям спутников Юпитера. Первыми часами служат регулярные затмения спутников, вторыми часами — земные часы астронома. Солнечная система в целом перемещается к апексу. Когда Юпитер и апекс расположены по одну сторону Земли, измеряемая скорость в неувлекаемом эфире равна $c-v$, где v — скорость движения к апексу. Когда Юпитер и апекс расположены по разные стороны от Земли, измеряемая скорость должна равняться $c+v$. Однако, как показал Бертон, возможная разность этих скоростей лежит за пределами точности астрономических наблюдений.

Опыты Майкельсона — Морли. В 1895 г. Лоренц доказал, исходя из основных положений электронной теории, что не могут существовать электромагнитные и оптические эффекты первого порядка, т. е. никакие опыты не могут обнаружить влияния движения Земли, если их точность позволяет измерить лишь величины первого порядка. Первый опыт второго порядка был

осуществлен А. Майкельсоном в 1881 г. В дальнейшем, анализируя эти опыты, С. И. Вавилов писал: «Получить определенные результаты с таким интерферометром, весьма несовершенным установленным, почти нечувствительным к ожидаемому эффекту, и в то же время резко отзывающимся на ничтожные механические толчки и температурные колебания, было почти безнадежно, во всяком случае требовалось большое число наблюдений при различных азимутах прибора» [21].

В 1887 г. Майкельсон и Морли опубликовали результаты новых опытов в Кливленде. В опыте Майкельсона свет от земного источника разделяется на два луча в стекляннй пластинке. Пластинка с одной стороны была покрыта настолько тонким слоем серебра, что лишь часть падающего света отражалась (и распространялась под углом 90° к падающему лучу), а другая часть проходила дальше. На примерно равных расстояниях от пластинки на пути отраженного и проходящего лучей и перпендикулярно им расположены два зеркала, отражающие свет обратно к пластинке. При помощи зрительной трубы наблюдаются интерференционные полосы, положение которых зависит от разности оптических путей обоих лучей. Если предположить, что скорость света неодинакова в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то положение интерференционных полос будет зависеть от разности скоростей в указанных направлениях.

Скорость света относительно прибора вдоль пути от пластинки до одного зеркала и по пути от зеркала к пластинке соответственно равна $c-v$ и $c+v$. Полное же время прохождения света в обоих направлениях будет

$$t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2l_1/c}{1-v^2/c^2}.$$

Пока свет проходит от пластинки до второго зеркала перпендикулярно скорости прибора v , весь прибор смещается на расстояние

$$a = l_2 \frac{v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}},$$

а путь, пройденный светом, равен

$$l = \sqrt{l_2^2 + a^2} = \frac{l_2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

В этом случае свет проходит расстояние от пластинки к зеркалу и обратно за время

$$t_2 = \frac{2l_2}{c \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Таким образом, разность времен прохождения света в одном и другом плечах прибора равна

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left\{ \frac{l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - l_2 \right\}.$$

После поворота прибора на 90° вокруг вертикальной оси соответствующие величины будут иметь значения

$$\bar{t}_1 = \frac{2l_1/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad \bar{t}_2 = \frac{2l_2/c}{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

так что

$$\Delta \bar{t} = \bar{t}_1 - \bar{t}_2 = \frac{2/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left\{ l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\}.$$

Тогда

$$\Delta \bar{t} - \Delta t = - \frac{2/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (l_1 + l_2) \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right\}.$$

Разлагая в ряд правую часть последнего равенства и ограничиваясь величинами порядка $(v/c)^2$, получаем

$$\Delta \bar{t} - \Delta t = - \frac{1}{c} (l_1 + l_2) \frac{v^2}{c^2}.$$

Отношение величины смещения (Δs) интерференционной полосы к ширине (s) полосы равно разности $\Delta \bar{t} - \Delta t$, деленной на период колебания световой волны:

$$\frac{\Delta s}{s} = - \frac{v}{c} (l_1 + l_2) \frac{v^2}{c^2}.$$

Установка в опытах Майкельсона 1887 г. монтировалась на квадратной каменной плите со стороной 1,5 м и толщиной 30 см. Плита опиралась на толстое деревянное кольцо, погруженное в кольцеобразный железный сосуд с ртутью. Общая длина оптического пути каждого из интерферирующих лучей была около 11 м; следовательно, на этом пути укладывалось $2 \cdot 10^7$ длин волн желтой линии натрия, и ожидаемый эффект смещения должен был быть равным 0,36 ширины интерференционной полосы. Но в действительности эффект не превышал 0,02 ширины полосы.

Майкельсон и Морли на основе своих опытов пришли к выводу о том, что нет оснований пытаться обнаружить влияние

движения солнечной системы по наблюдениям оптических явлений на поверхности Земли. Однако они не исключали возможности того, что даже на небольшой высоте над уровнем моря или на вершине уединенной горы указанный эффект будет обнаружен.

В 1905 г. Морли и Миллер изготовили более чувствительный интерферометр и повторили опыт Майкельсона. Теория предсказывала смещение в 1,5 ширины полосы, тогда как наблюдаемое значение не превышало 0,0076 ширины полосы.

Теоретической трактовкой опытов Майкельсона с позиций классической физики на протяжении многих лет занимался Г. А. Лоренц. Он считал, что общий метод, которым можно было бы пользоваться в задачах, связанных с распространением волн, состоит в применении принципа Гюйгенса.

Для объяснения отсутствия всякого влияния поступательно-го движения Земли Лоренц предложил гипотезу, высказанную независимо от него также Фицджеральдом, что размеры твердого тела, движущегося сквозь эфир, испытывают сокращение в направлении движения порядка $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Длина двух отрезков внутри тела, из которых один расположен параллельно направлению движения, а другой — перпендикулярно, имеющих одинаковую длину в неподвижном теле, относятся друг к другу, как

$$\frac{L_2}{L_1} = 1 + \frac{v^2}{2c^2}.$$

Эти изменения длины приводят в опыте Майкельсона к изменению фаз интерферирующих лучей.

В дальнейшем Лоренц, учитывая критику Пуанкаре, стал строить теорию, исходя из двух предположений: а) электроны во время движения сжимаются так, что по направлению движения их размеры уменьшаются в отношении $\sqrt{1 - v^2/c^2}$; б) все силы взаимодействия между электронами и незаряженными частицами меняются так же, как силы взаимодействия между заряженными частицами. На основе этих предположений Лоренц пришел к известным формулам преобразования координат и времени при переходе от одной системы отсчета к другой, движущейся относительно первой равномерно и прямолинейно. Сокращение, введенное Лоренцом, понималось как свойство вещества, определяемое силами, действующими на атомы. В дальнейшем выяснился кинематический характер явления сокращения и его независимость от физико-химических свойств вещества.

В более поздних оценках идеи Лоренца о сокращении размеров движущихся тел мы встречаемся с различными точками зрения. Хвольсон писал: «Рассмотренная гипотеза должна казаться странной и даже маловероятной. Однако Лоренц ука-

зывает на следующие соображения, которые делают ее более правдоподобной. Допустим, что атомы тел состоят главным образом или даже исключительно из электронов и что силы сцепления, определяющие собой условия внутреннего равновесия атомов, а следовательно, и форму всего тела, имеют отчасти или даже исключительно электромагнитный характер. При движении тела, т. е. входящих в его состав электронов, происходит деформация внутренних электромагнитных полей, меняются силы сцепления и потому нарушаются условия равновесия. Устанавливается новое равновесие, при котором размер тел меняется» [22].

Историческая оценка гипотезы Лоренца, данная Хвольсоном, является наиболее распространенной. Глубокий анализ гипотезы Лоренца дан Л. И. Мандельштамом. «Конечно, — пишет Мандельштам, — в этой гипотезе много неудовлетворительного, она специально выдумана, но Лоренцу удалось кое-что сделать в направлении ее обоснования. Что значит, что стержень имеет определенную длину? Это значит, что все частицы находятся в определенных положениях равновесия. Лоренц показал, что при движении относительно эфира электромагнитные силы меняются так, что система в новом равновесии сокращена именно в $\sqrt{1-\beta^2}$ раз. Но, во-первых, было известно, что одни лишь электрические силы не дают устойчивого равновесия, а во-вторых, частицы всегда движутся (тепловое движение), так что все это было хорошо, но надлежащего объяснения не давало. Лоренц попробовал органически соединить сокращение со своей теорией и предположил для этого, что электроны сплюсываются при движении и что неэлектромагнитные силы также меняются при движении по тому же закону. Хотя все это и объясняет опыты второго порядка, но слишком все искусственно, принцип же относительности не удовлетворен» [23].

Коль подверг теоретическому анализу само содержание опыта Майкельсона. В первой части своей работы «Об опыте Майкельсона», опубликованной в 1909 г., Коль детально исследует влияние движения на ход луча, отраженного от зеркала. Это влияние отмечалось уже Майкельсоном в 1887 г. и более подробно исследовано Лоджем.

Коль различает абсолютный и относительный ход лучей в зависимости от того, относится ли он к некоторой абсолютной системе отсчета или к координатной системе, связанной с Землей и перемещающейся вместе с ней. Коль считает, что во втором случае, при учете членов второго порядка, ход луча будет иной, чем на это указывают при изложении опыта Майкельсона. Кроме того, расширяя рассуждения и переходя от монохроматического света к белому свету, Коль отмечает, что возникающие соотношения в этом случае оказываются более сложными и точный расчет смещения полос невозможен.

В силу указанных трудностей Коль считает, что опыт Майкельсона не мог решить вопроса о неподвижном эфире, что исследованию, согласно Колью, подлежит изменение интенсивности спектральных линий. Коль допускает, что свет претерпевает дифракцию на щели линзы коллиматора, а видимая интерференция получена от двух дифракционных картин с постоянной разностью хода.

В 1910 г. Лауэ выступил с критическим анализом работы Коля. Лауэ ясно показал, что в опытах Майкельсона и Морли речь идет о полосах равной толщины. В 1911 г. дискуссия вокруг опытов Майкельсона была начата Будде. На 83-м собрании немецких естествоиспытателей и врачей в Карлсруэ Будде говорил, что Майкельсон, пренебрегая вращением Земли вокруг оси, слагает ее движение из двух компонент — вращения вокруг Солнца и движения планетной системы во Вселенной. Пренебрежение вращением Земли обоснованно; однако, если хотят иметь истинное движение в эфире, нужно ввести третью компоненту — движение звезд относительно эфира. Но эта компонента совершенно неизвестна и вносит неопределенность в опыт Майкельсона. Истинные результаты можно получить лишь при помощи серии наблюдений, проводимых систематически.

Далее Будде указывает, что вторая ошибка состоит в том, что расчеты ведут с абсолютными длинами путей распространения света. Но в опытах речь идет об интерференционных явлениях, они зависят от разности фаз, а разность фаз зависит от числа длин волн, укладываемых на отрезках, пройденных светом. В неподвижной системе отсчета число длин волн пропорционально длине оптического пути; при движении же системы с прибором нужно применить принцип Допплера, вследствие которого возникает разность длин волн во взаимно перпендикулярных направлениях. Лауэ, выступавший в прениях по докладу Будде, указал, что опыты Майкельсона повторялись на протяжении многих дней, на протяжении разных времен года.

Начиная с 1921 г., Д. Миллер произвел многочисленные измерения, оказавшиеся настолько странными и противоречивыми, что ими пришлось заняться более внимательно. Опыты производились на высоте 1800 м на Маунт-Вильсон.

В 1925 г. Миллер писал: «Существует определенное смещение интерференционных полос, такое, какое было бы вызвано относительным движением Земли и эфира на Маунт-Вильсон со скоростью примерно 10 км/сек, т. е. около трети орбитальной скорости Земли. При сравнении этого результата с прежними наблюдениями в Кливленде напрашивается мысль о частичном увлечении эфира, которое уменьшается с высотой. Думается, что пересмотр кливлендских наблюдений, с этой точки зрения, должен показать, что они находятся в согласии с подобными предположениями, и привести к заключению, что опыт Майкель-

сона — Морли не должен давать нулевого результата в точном смысле слова, и по всей вероятности никогда такого результата не давал» [24, стр. 46]. Уже в сообщении 1926 г. Миллер ставит под сомнение зависимость эффекта от высоты.

Эти опыты широко обсуждались в связи с тем, что Миллер указывал, что им были приняты меры предосторожности и что каждая возмущающая причина была исчерпывающе исследована (изучались суточные и годовые вариации температуры, метеорологические условия, лучистая теплота, магнетизм, магнитострикция, гравитационная аномалия, влияние методов освещения, скорость и направление вращения), но ни одно из этих обстоятельств не могло объяснить наблюдаемый эффект.

Так как результаты наблюдений Миллера не были похожими на то, что можно было бы ожидать при годовом движении Земли вокруг Солнца, то он предположил, что солнечная система движется к некоторой точке в созвездии Дракона, прямое восхождение которой 262° и склонение $+65^\circ$, со скоростью более 200 км/сек . Однако Р. Вильсон нашел для апекса солнечной системы прямое восхождение, равное $270^\circ 8'$, и склонение, равное $27^\circ 1'$, а для скорости движения солнечной системы — 19 км/сек . В 1927 г. Нассау и Морс получили для прямого восхождения апекса — 272° , для склонения — $33^\circ 40'$ и для скорости солнечной системы — $24,8 \text{ км/сек}$. В 1927 г. С. И. Вавилов писал: «Таким образом, толкование Миллера не согласуется с его наблюдениями, которые остаются голым фактом, требующим объяснения. Независимость направления эффекта от времени суток указывает, что причину надо искать в местных влияниях; связать его с движением Земли, какого бы рода движение ни было, нельзя, иначе пришлось бы усомниться в суточном вращении Земли. Вследствие этого вращение азимут максимального эффекта должен колебаться к востоку и западу, чего на опыте нет. Поскольку эффект Миллера на основании сказанного совсем не связан с движением Земли, постольку он едва ли имеет какое-либо отношение к вопросу об увлечении эфира.

Чем в действительности объясняется непериодическое смещение полос в опытах Майкельсона — Морли и систематическое северо-западное смещение у Миллера, сказать трудно, — на это может быть немало причин в таком чувствительном открытом приборе, каков описанный интерферометр; ответить на вопрос определенно может только сам экспериментатор» [24, стр. 56—57].

Многие считали, что результаты Миллера обусловлены температурным эффектом. Зильберштейн, много занимавшийся этим вопросом, писал, что результаты Миллера полностью опровергаются. Джиорджи подвергал сомнению результаты Миллера, указывая на трудности их теоретического истолкования.

Большой оптический путь, определявший чувствительность прибора, привел к тому, что ничтожное неравномерное измене-

ние температуры воздуха сопровождается изменением показателя преломления воздуха, и на таком большом пути это способно вызвать смещение полос.

Эти соображения привели к новой конструкции экспериментальной установки и новым опытам, неизменно подтверждавшим результаты Майкельсона.

Опыты Трoutона — Нобла. Простейшая теория опыта Трoutона — Нобла основывалась на том, что пластинка, заряд которой равен e , при движении относительно прибора со скоростью v производит действие, эквивалентное току величины ev .

Пластинка с плотностью заряда σ на ее поверхности, движущаяся со скоростью v , лежащей в ее плоскости, возбуждает магнитное поле, перпендикулярное направлению скорости и параллельное пластинке и по абсолютной величине равное $2\pi\sigma v$. Напряженность магнитного поля во внутреннем пространстве двух сближенных обкладок конденсатора будет

$$H = 4\pi\sigma v.$$

Энергия магнитного поля

$$E_m = \frac{H^2 S \cdot d}{8} = 2\pi\sigma^2 v^2 S d, \quad \mu = 1,$$

а электростатическая энергия конденсатора

$$E_e = \frac{2\pi}{m} \sigma^2 S d, \quad m = \frac{1}{c^2}.$$

Таким образом, полная энергия будет равна

$$E = 2\pi\sigma^2 v^2 S \cdot d + \frac{2\pi}{m} \sigma^2 S d = \frac{2\pi}{m} \sigma^2 S d \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right).$$

В том случае, если вектор скорости образует с плоскостью обкладок конденсатора угол α ,

$$E = E_e \left[1 + \left(\frac{v^2}{c^2} \right) \cos^2 \alpha \right].$$

При этом возникают силы, стремящиеся повернуть конденсатор в положение, в котором его полная энергия минимальна. Из полученной формулы легко вычислить соответствующий момент. Трoutон и Нобл пытались обнаружить этот поворот.

Конденсатор состоял из оловянных листочков, проложенных слюдой. Одна группа пластин соединялась проволочным подвесом, вторая посредством тонкой платиновой проволоки соединялась с раствором серной кислоты. Конденсатор вместе с нитью и кислотой помещался внутри цинкового цилиндра, соединенного с землей и кислотой. Конденсатор был окружен целлулоидовым позолоченным сосудом и заряжался до потенциала в 2000—3000 в. Повороты конденсатора наблюдались при

помощи зеркальца, укрепленного на нити, и шкалы, отстоявшей от прибора на 1 м.

Наблюдались положения равновесия заряженного конденсатора в различное время суток. Опыт Трутона и Нобла показал, что электрически заряженный плоский конденсатор, подвешенный на крутильной нити, сохраняет неизменным положение равновесия при изменении направления движения Земли по отношению к вертикальной плоскости его обкладок. В момент максимального эффекта движение должно было бы приводить к паре сил с моментом $7,4 \cdot 10^{-4}$ эрг; этому соответствовало бы перемещение зайчика на 3,4 см. В действительности лишь случайные отклонения достигали 5 мм.

В 1904 г. Лоренц анализировал более ранний опыт, выполненный Трутоном по предложению Фицджеральда. В 1905 г. Ланжевэн в работе «О невозможности обнаружить поступательное движение Земли с помощью физических опытов» дал анализ опытов Трутона — Нобла. Он писал, что независимо от того, будем ли мы рассматривать сокращение в направлении, параллельном движению, как следствие электромагнитного происхождения сил сцепления или как некоторую связь, наложенную на материальные системы, сокращение объясняет отрицательный результат опытов Трутона и Нобла. Ланжевэн показал, что если допускать лоренцово сокращение в качестве связи, наложенной на систему, то причину компенсации пары сил, которая должна была бы существовать при отсутствии сокращения, нужно искать в самом конденсаторе.

Он предлагает применять принцип, аналогичный принципу Гамильтона. Согласно этому принципу, переход электромагнитной системы из конфигурации, соответствующей моменту t_0 , к конфигурации, соответствующей t_1 , определен условием, чтобы выражение

$$\int_{t_0}^{t_1} (W_e - W_m) dt$$

(где W_e — электрическая, а W_m — магнитная энергия) было стационарным для всякого возможного изменения, допускаемого связями. «Если мы рассматриваем, — пишет Ланжевэн, — заряженный плоский конденсатор, или вообще какую-нибудь наэлектризованную систему, переносное движение которой вызывает магнитное поле, то легко показать, вычисляя электрическую и магнитную энергию, что в предположении сокращения этой системы в отношении $\sqrt{1-v^2/c^2}$ функция Лагранжа L' для движущейся системы будет $L' = L\sqrt{1-v^2/c^2}$, где L — функция Лагранжа для покоящейся системы без сокращения» [25]. При этом функция L' независима от ориентации системы, компенсация происходит внутри наэлектризованной системы, и

Опыт Трутона и Нобла должен дать отрицательные результаты для любого порядка приближения.

В дальнейшем в качестве упрощенной модели конденсатора Трутона — Нобла стали рассматривать два очень маленьких заряженных тела, которые удерживаются на постоянном расстоянии друг от друга при помощи жесткой связи (стержня). Нетрудно показать, что согласно классической физике появляется вращающий момент электрических сил, не компенсируемый никаким иным моментом сил. С точки зрения теории относительности вращающий момент, вызванный электрическими силами, компенсируется равным и противоположным ему механическим моментом.

Опыты Трутона и Нобла были электродинамическим аналогом оптического опыта Майкельсона. Несмотря на это, после создания теории относительности на них не обратили должного внимания.

Релятивистская трактовка опыта была дана в 1912 г. Лауэ. Но Лауэ не удалось привлечь внимание физиков к этим опытам. Не вызвала интереса у читателей и небольшая заметка Ван-дер-Ваальса. Отмечая простоту истолкования отрицательного результата опытов Трутона и Нобла в теории относительности, Ван-дер-Ваальс подтверждает возникновение вращательного момента при движении двух зарядов противоположных знаков, находящихся на постоянном расстоянии друг от друга. Однако вызванное этим моментом ускорение, вследствие неодинаковости поперечной и продольной массы, направлено по линии, соединяющей эти заряды, и не вызывает вращения. Это же имеет место, если заряды соединены стержнем. В связи с этим Эренфест заметил, что в соединяющем стержне должны возникать упругие натяжения, приводящие к возникновению момента, равного и противоположного тому, который действует на заряды.

Указанные работы полностью подтвердили возможность релятивистской интерпретации опытов Трутона и Нобла. Однако интерес к ним стал проявляться только тогда, когда результаты опытов Миллера, якобы обнаружившего наличие «эфирного ветра», были использованы противниками теории относительности для ее опровержения. Тогда возникла потребность повторения и опытов Трутона и Нобла. Первым эту задачу выполнил Томашек. При использовании небольшого конденсатора значительной емкости и очень тонких нитей подвеса ему удалось повысить чувствительность установки в 10 раз. Хотя в его установке не было никаких принципиальных изменений, сама методика измерений давала возможность получения более достоверных результатов. Если Трутон и Нобл производили измерения только в течение десяти дней, и против их результатов можно было привести те же возражения, которые Будде приводил против опыта Майкельсона, то у Томашека наблюдения велись в

Течение более продолжительного времени и случайные компенсации исключались. Несмотря на все принятые предосторожности, никаких систематических отклонений не было обнаружено, а несистематические отклонения соответствовали скорости эфирного ветра не более 3 км/сек. опыты производились на вершине горы Юнгфрау (3257 м над уровнем моря). В опыте 1926 г. чувствительность установки позволяла обнаруживать наличие скорости 0,5 км/сек, но даже такие скорости не наблюдались.

Качество установки Томашека оспаривалось Чейзом, указавшим на наличие значительных сил трения между опущенной в серную кислоту проволокой и кислотой. Сам Чейз все-таки счел нужным повторить (в Пасадене) опыты Трутона и Нобла. Но даже после дополнительных технических усовершенствований, давших очень высокую точность, никакого положительного эффекта не было обнаружено. К теории этого вопроса вернулся Эпштейн. Он отметил, что необходимо учитывать не только изменение размеров конденсатора в отношении $1 : (1 - v^2/c^2)$, но и разницу между продольной и поперечной массами электронов и ядер, поскольку ядра атомов, как тогда считалось, состоят из заряженных частиц. Если электроны рассматривать как твердые заряженные шарики, то в этом случае компенсируется $\frac{4}{5}$ вращательного момента и эффект будет равняться лишь $\frac{1}{5}$ от ожидаемого. Эпштейн считает, что благодаря этому обстоятельству опыты Томашека и Чейза могут гарантировать отсутствие эфирного ветра со скоростью более 9 км/сек.

Но даже если согласиться с этим замечанием, опыты Трутона — Нобла. Томашека и Чейза могут служить экспериментальным подтверждением теории относительности в той же степени, что и опыты Майкельсона.

Лауэ писал по поводу опытов Трутона — Нобла и Томашека: «Их результат является столь же убедительным доказательством справедливости принципа относительности, как в эксперимент Майкельсона с интерферометром. Оба эти эксперимента говорят о необходимости новой механики: эксперимент Майкельсона — потому, что он показывает сжатие движущихся тел в направлении движения, а эксперимент Трутона и Нобла — потому, что он показывает, что вращательный момент вовсе не всегда приводит к вращению тела, на которое он действует. Таким образом, новая эпоха в физике создала и новую механику» [26, стр. 734].

Исключительное экспериментальное мастерство было проявлено Томашеком при выполнении серии опытов, связанных с влиянием движения Земли на величину силы тяжести.

С точки зрения классической механики скорость света меняется относительно движущейся среды. Вследствие этого меняется промежуток времени, необходимый световому лучу для прохождения пути в этой среде. Согласно Лоренцу, в направлении движения происходит сжатие движущейся системы, ком-

пенсирующее измерение указанного промежутка времени.

Опыты Майкельсона и Трутона — Нобла показали, что даже при космических скоростях не проявляется и миллионная доля тех эффектов, которые следовало бы ожидать вследствие движения Земли относительно эфира. Несмотря на это, в 20-х годах был предпринят ряд попыток анализа мысленных экспериментов и выполнения реальных, которые должны были дать положительный эффект.

Так, в нескольких принципиально ошибочных работах Курвуазье приходит к выводу, что космическое движение Земли должно вызывать колебания величины вертикальной составляющей ускорения силы тяжести, достигающие шести миллионов ее полного значения. Утверждение Курвуазье вызвало интересное экспериментальное исследование Томашека. В его опытах было использовано удлинение спиральной пружины, на которой было подвешено тело определенной массы. При изменении ускорения силы тяжести должен был меняться вес тела, а следовательно, и удлинение пружины. Для измерений использовалась схема, дающая возможность регистрировать изменения в одну стомиллионную сантиметра. Принимались специальные меры для исключения внешних влияний.

На основе результатов опытов Томашек заключил, что если и существует какое-либо влияние движения Земли на ускорение силы тяжести, то оно меньше одной стомиллионной, и нет основания принять гипотезу Лоренца о сжатии Земли в результате ее движения в пространстве.

Опыт Саньяка. В опыте Саньяка по углам квадрата располагают три металлических зеркала и полупрозрачную пластинку, причем зеркала устанавливают перпендикулярно диагонали, а пластинку — по диагонали квадрата. На пластинке укрепляется источник монохроматического света и фотографическая пластинка. Лучи, идущие от источника и разделенные при помощи полупрозрачной пластинки, интерферируют. Вся система укреплена на доске. Систему можно привести во вращение вместе с источником света и фотопластинкой. Если диск приведен во вращение, то луч, направление обхода которого совпадает с направлением вращения, проходит более длинный путь, чем луч, направление которого противоположно направлению вращения так, что, если эфир не увлекается, эти два луча проходят свои пути в неодинаковые интервалы времени.

Л. И. Мандельштам дал простой вывод, согласно которому при неувлекаемом эфире уже в первом порядке по v/c должно иметь место запаздывание одного луча относительно другого. При полностью увлекаемом эфире $\Delta T = 0$; согласно же теории Лоренца, $\Delta T \neq 0$.

В 1925 г. Майкельсон и его сотрудники произвели опыты, где вращение установки обусловлено вращением Земли вокруг

своей оси. В опыте Майкельсона роль вращающегося диска играет Земля. Теория подобного опыта была развита Майкельсоном в 1904 г. Вместо угловой скорости ω входит составляющая угловой скорости вращения Земли в направлении отвеса в месте наблюдения.

Первые такие опыты были произведены в 1923 г. на Маунт-Вильсон. При помощи зеркал лучи обходили контур в противоположных направлениях. Поскольку лучи проходили большие расстояния через воздух, нельзя было добиться хороших результатов. На открытом воздухе интерференционные полосы были настолько неустойчивы, что невозможно было производить опыты даже при наилучших атмосферных условиях. Майкельсон построил систему труб, из которых был выкачан воздух и в которых распространялся свет. Зеркала и полупрозрачная пластинка размещались по углам прямоугольника со сторонами в 340 и 610 м. Было определено среднее смещение по 269 наблюдениям, которое оказалось в хорошем соответствии с теорией.

Этот опыт доказывает «неподвижность эфира» относительно движущейся Земли; точнее, он еще раз доказывает несостоятельность теории полного увлечения эфира.

Зоммерфельд указал, что теория этих опытов может быть дана на основе эффекта Допплера. Полупрозрачная пластинка действует как движущийся источник, излучающий вперед и назад свет различной длины волн. Смещение интерференционных полос есть результат различия в длине волн для лучей, распространяющихся в прямом и противоположных направлениях. При движущихся тангенциально зеркалах дополнительного эффекта Допплера не возникает.

Косвенными экспериментальными подтверждениями специальной теории относительности могут служить эффект Комптона, зоммерфельдовская теория тонкой структуры атомных спектров, время жизни мезонов и т. д.

Тонкая структура атомных спектров. Как известно, тонкая структура спектральных линий обусловлена магнитным взаимодействием электрона в атоме. В случае многоэлектронного атома спиновый магнитный момент электрона взаимодействует с магнитным моментом, создаваемым его орбитальным движением, и со спиновыми магнитными моментами других электронов.

Взаимодействие орбитального и спинового магнитных моментов электрона приводит к добавочной энергии атома, которая зависит от взаимной ориентации в пространстве рассматриваемых двух моментов, и, следовательно, к мультиплетной структуре уровней атома. В результате спектральные линии оказываются расщепленными на ряд компонент. Поскольку в спектрах легких элементов расстояние между этими компонентами невелико, то подобное расщепление спектральных линий получило название «тонкой структуры».

Взаимодействие в рассматриваемом случае спинового и орбитального магнитных моментов обратно пропорционально c^2 и является релятивистским эффектом. Уравнение Шредингера позволило объяснить только основную закономерность (бальмеровского типа) спектров, поскольку при решении задачи Кеплера на основе этого уравнения не учитывается релятивистская зависимость массы от скорости и существование спина. Однако уже задолго до работ Шредингера и Дирака, вслед за тем, как Бору и Зоммерфельду удалось объяснить спектр атома водорода путем квантования с помощью адиабатических инвариантов, Зоммерфельд попытался в той же механической модели учесть релятивистские поправки. Он получил хорошие результаты в случае атома водорода благодаря тому, что в его теории взаимно компенсировались два фактора: отсутствие строгого волномеханического подхода и пренебрежение спином. Эта работа Зоммерфельда интересна и тем, что в ней впервые была введена постоянная тонкой структуры. Зоммерфельд опирается на формулы изменения массы со скоростью и на релятивистское выражение для кинетической энергии, а в дальнейшем — на релятивистскую механику в форме Гамильтона. Зоммерфельд прежде всего рассматривает элементарную задачу Кеплера, не учитывая движение самого ядра. В начало полярной системы координат он помещает ядро. Он исходит не из дифференциального уравнения движения данной задачи, а из законов сохранения момента количества движения и энергии.

В результате решения соответствующего линейного дифференциального уравнения относительно $S = 1/r$ имеем

$$S = 1/r = C = A \cos \gamma \phi.$$

Это уравнение отличается от нерелятивистского уравнения орбиты наличием множителя γ в аргументе косинуса. Затем, при переходе к условиям квантования и к вычислению энергии, Зоммерфельд придерживается механики в форме Гамильтона. Вводя действие вместо импульса, он получает дифференциальное уравнение Гамильтона — Якоби для релятивистской задачи Кеплера. Уравнение допускает разделение переменных r и ϕ . В результате Зоммерфельд получает общую релятивистскую формулу для водородоподобных атомов;

$$\frac{v}{R} = \frac{2}{\alpha^2} \left\{ \left[1 + \frac{\alpha^2 Z^2}{n_r + \sqrt{n_\phi^2 - \alpha^2 Z^2}} \right]_1^{-1/2} - \left[1 + \frac{\alpha^2 Z^2}{n_r + \sqrt{n_\phi^2 - \alpha^2 Z^2}} \right]_2^{-1/2} \right\},$$

где $\alpha = 2\pi e^2/hc$; n_r и n_ϕ — квантовые числа; $Z = 1, 2, 3$ для H, He⁺, Li⁺⁺ — атомный номер. Индексы 1 и 2 у квадратных скобок показывают, что в этих скобках для величин n_r и n_ϕ надо подставить значения, отвечающие соответственно начальному или конечному состоянию

Зоммерфельд писал: «Наша теперешняя спектральная формула уже больше не зависит только от суммы $n_r + n_\phi$... Отсюда следует, что линии с одинаковым главным квантовым числом, считавшиеся прежде совпадающими, при релятивистском рассмотрении оказываются разделенными. Такое разделение обусловлено поправочным членом, содержащим в качестве множителя малую величину $\alpha^2 = 5,3 \cdot 10^{-5}$ » [27].

Строгая квантовомеханическая теория тонкой структуры спектральных линий атома, основанная на теории Дирака и учитывающая как релятивистскую зависимость массы электрона от скорости, так и спин электрона, привела качественно к тем же результатам, которые были получены Зоммерфельдом на базе старой квантовой теории Бора; теория тонкой структуры находится в прекрасном согласии с экспериментом и, таким образом, может служить косвенным доказательством справедливости специальной теории относительности.

Эффект Комптона. Согласно волновой теории света было естественно ожидать, что частота рассеянного излучения должна совпадать с частотой падающего излучения. Однако некоторые наблюдения показали, что при рассеянии жестких рентгеновских лучей, и особенно γ -лучей, в составе рассеянного излучения появляется излучение с большей длиной волны. Появление излучения с большей длиной волны в составе рассеянного излучения до 1923 г. объясняли побочными факторами. В 1922—1923 гг. Комптон, пользуясь рентгеновским спектрографом, показал, что это явление связано с самим механизмом рассеяния и что длина волны рентгеновских лучей при рассеянии с поверхности графита всегда увеличивается. Уже элементарная теория эффекта Комптона служит косвенным экспериментальным доказательством теории относительности.

Явление рассеяния света представляет собой мгновенное взаимодействие кванта рентгеновских лучей с электроном. В начальный момент электрон рассматривается как неподвижный. Обмен энергией и импульсом при соударении фотона (кванта излучения) с электроном приводит к уменьшению энергии кванта и к изменению его частоты.

Закон сохранения энергии может быть записан в виде

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Здесь m_0c^2 — энергия покоя электрона; $h\nu_0$ — начальная энергия фотона (кванта света); $h\nu$ — энергия фотона после соударения; $m_0c^2/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ — энергия электрона после соударения.

Закон сохранения количества движения запишем в форме

$$\hbar \mathbf{k}_0 = \hbar \mathbf{k} + m \mathbf{v},$$

где $\hbar \mathbf{k}_0$ — начальный импульс фотона; $\hbar \mathbf{k}$ — импульс фотона после соударения (здесь \mathbf{k}_0 и \mathbf{k} — соответствующие волновые векторы); $m \mathbf{v}$ — импульс электрона после соударения. Из записанных выше соотношений путем несложных выкладок приходим к формуле

$$\Delta \lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

где комбинация $h/m_0 c$ трех универсальных постоянных называется комptonовской длиной волны; φ — угол, образованный направлением фотона после соударения с его начальным направлением.

Первоначальная теория эффекта Комптона дана одновременно Комптоном и Дебаем в 1923 г. Теория Комптона — Дебая была теорией рассеяния на свободных электронах и рассматривала лишь поведение смещенной линии. В дальнейшем в теории стали учитывать внутриатомные связи; в этом случае релятивистская формула для сохранения энергии должна содержать члены, выражающие работу ионизации атома и кинетическую энергию атома, а релятивистская формула сохранения импульса должна содержать еще член, определяющий импульс атома.

Измерение скорости света. Скорость распространения электромагнитных волн — одна из фундаментальных физических констант. Эта константа приобрела особо важное значение в теории относительности. В отличие от других вопросов электродинамики движущихся сред этот вопрос имеет давнюю историю. В древности вопрос о конечной или бесконечной скорости распространения света не мог быть связан с трактовкой каких-либо опытов или достоверных наблюдений. Возможности проведения опытов и наблюдений в средневековой физике также не позволяли найти пути к правильной постановке задачи. Даже значительно позже, в период создания Галилеем «*Jl Saggiatore*», свет представлялся ему потоком бесконечно быстрых частиц. Впоследствии Галилей склонялся к представлению о конечной скорости распространения света и представлял решение вопроса опыту.

В книге «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению» (1638) Галилей переходит уже к эксперименту для решения вопроса о конечной или бесконечной скорости света. Эксперименты, предложенные Галилеем, были частично осуществлены членами Флорентийской академии, но не дали однозначных результатов. Галилей полагал, что если опыты с двумя наблюдателями, находящимися на расстоянии двух или трех

миль друг от друга, окажутся неудачными, то необходимо будет сделать вывод о мгновенном распространении света. Фрэнсис Бэкон, рассматривая проблему скорости света, не смог остановиться на какой-либо определенной точке зрения. То, что опыты Галилея или какая-либо их модификация не смогут привести к удовлетворительному решению проблемы, было ясно уже Декарту и об этом же позднее писал Гюйгенс. Что касается опытов, которые можно произвести в земных условиях с помощью источников света, расположенных на больших расстояниях друг от друга, то они доказывают, что свету не надо заметного времени, чтобы пройти эти расстояния.

Основные идеи Декарта по вопросу о скорости света наиболее рельефно выражены в его письмах к Бекману. Для Декарта характерно глубокое проникновение в сущность эксперимента по определению скорости света, ясное понимание того, что время распространения света на сравнительно небольшие расстояния и в доступные тогда для измерения промежутки времени являются величинами разных порядков. Все то, что оказалось камнем преткновения и для гения Галилея, и для четкого логического мышления Бекмана, и для эмпирического подхода флорентийцев, было преодолено великим французским мыслителем. В дальнейшем Гюйгенс, опираясь на мысленные опыты Декарта с лунными затмениями и астрономическими наблюдениями Рёмера, смог связать вопрос о конечной скорости света с предположением, что идет речь не о переносе тела с такой большой скоростью, а о последовательном движении, переходящем от одних тел к другим. «Поэтому,— пишет Гюйгенс,— при размышлении об этих вещах я беспрепятственно предположил, что истечение света происходит постепенно. Действительно, с помощью этого предположения все эти явления могли быть объяснены, тогда как, если придерживаться противоположного взгляда, все было непонятно. И мне всегда казалось, и многим другим вместе со мной, что даже Декарт, который поставил целью вразумительное объяснение всех вопросов физики и который, несомненно, гораздо лучше успел в этом, чем кто-либо до него, даже Декарт по поводу света и его свойств не высказал ничего, что не было полно трудностей для понимания, или даже непостижимо» [28].

Мы видим, как тесно переплетался вопрос о скорости света со многими другими физическими проблемами. Первое численное определение скорости света принадлежит Рёмеру. В многочисленных исследованиях по истории физики Рёмеру приписывают многообразие значений скорости света, начиная от 193 120 до 327 000 км/сек. Однако в докладе, опубликованном в 1676 г. в «Journal des Sçavans», Рёмер не предložил точно определенно-го значения скорости света. Из полученного Рёмером значения 22 мин для времени прохождения светом расстояния, равного

диаметру земной орбиты, Гюйгенс нашел скорость света, а затем последнюю сравнил со скоростью звука.

Ньютон в первом издании «Математических начал» для времени распространения света от Солнца до Земли принимал значение около 10 *мин.* В «Оптике» он останавливается на значениях около 7 или 8 *мин.* Эта же величина появлялась в последующих изданиях «Математических начал». В дальнейших изданиях своей «Оптики» Ньютон вслед за Гюйгенсом перешел к сравнению скоростей распространения света и звука.

Работы Брэдли послужили подтверждением конечности скорости распространения света. Его наблюдения дали значение угла аберрации, приблизительно равное $20''$, 2, исходя из которого Брэдли подсчитал, что скорость света в 10 210 раз больше скорости Земли на своей орбите. Брэдли не приводил численного значения скорости света, но данное им значение в 8 *мин* 12 или 13 *сек* для времени распространения света от Солнца до Земли соответствует значению скорости света, близкому к реальному. Дальнейшие астрономические определения не внесли однозначность в определение скорости света. Возникла необходимость в непосредственных физических методах определения ее.

В 1834 г. Уитстон предложил принцип вращающегося зеркала для фиксирования коротких промежутков времени. 3 декабря 1838 г. в Парижской академии наук выступил Араго с предложением применить вращающееся зеркало к сравнению скорости света в воздухе и жидкости.

Однако ни Уитстон, ни Гершель, писавший в 1835 г. Уитстону об определении скорости света, ни Бессель и Зильберман, предлагавшие Араго механические видоизменения его прибора, ни аббат Лаборд, предлагавший способ, аналогичный опыту Физо, не осуществили своих замыслов. Определение скорости света в земных условиях впервые было осуществлено Физо в 1849 г.

30 апреля 1850 г. Физо в письме в «*Journal des Debats*» сообщил, что им экспериментально осуществлены идеи Араго о сравнении скорости света в воздухе и в воде. Работы Араго, Физо и Фуко знаменуют собой исключительно важный этап в истории определения скорости света.

С определением скорости света связаны также исследования о соотношении между электростатическими и электромагнитными единицами. «Трудно переоценить,— пишет Л. И. Мандельштам,— значение всего пути, который привел к постановке вопроса о новой универсальной постоянной величине v и к экспериментальному ее определению. К этому мы вернемся ниже. Пока я хотел бы только отметить, что для максвелловской электромагнитной теории света только что указанное определение v и сравнение ее со значением скорости распространения света сыграло роль, аналогичную той, какую для ньютоновской теории тяготения имело вычисленное значение радиального ускорения Луны

при движении ее вокруг Земли и сравнения этой величины с ускорением падающих тел на земной поверхности. Несомненно, и здесь, и там дело шло о решающем этапе в ходе мыслей как Ньютона, так и Максвелла» [29]. В этом направлении многочисленные исследования были выполнены Вебером. В самой теории Вебера нет основания для сопоставления величины v со скоростью света. В письме Максвелла к Фарадею от 19 октября 1861 г. Максвелл впервые упомянул, что из определенного Кольраушем и Вебером численного отношения между статическим и магнитным действием электричества он определил скорость распространения поперечных колебаний, почти совпадающую с определением скорости света прямым путем. В 1863 г. Максвелл и Флеменг Дженкин указали на пять способов определения величины v . Хорошие результаты были получены при помощи трех из этих пяти методов.

А. Корню повторил опыты Фуко с вращающимся зеркалом, но в дальнейшем оставил этот метод и усовершенствовал опыт Физо.

В 1878 г. появилась первая заметка Майкельсона, ставшая отправным пунктом целой серии исследований по определению скорости света. Майкельсон поместил плоское отражающее зеркало в сопряженном фокусе источника света и расположил собирающую линзу между вращающимся и неподвижным зеркалом. в то время как раньше ее располагали между источником света и вращающимся зеркалом. Опыт Майкельсона представлял собой видоизмененный вариант опытов Фуко. Существенные усовершенствования были внесены Ньюкомбом в 1882 г., и по его предложению Майкельсон повторил свои опыты в 1891 г. В 1902 г. Майкельсон сравнил свои данные, полученные методом вращающегося зеркала, с данными Ньюкома и Корню и нашел в качестве наиболее вероятного значения скорости света $299\,890 \pm \pm 60$ км/сек. Майкельсон внес существенные изменения в метод вращающегося зеркала, сделав излишним измерения малых углов отклонения. Это было достигнуто тем, что вращающемуся зеркалу давалась форма правильного многогранника. В дальнейшем работы Майкельсона, проведенные с 1921 по 1926 г., позволили измерять скорость света с точностью до 4 км/сек. В этих опытах, несмотря на значительное расстояние (71 км) между Маунт-Вильсон и горой Сан-Антонио, сигналы были достаточно отчетливы и интенсивны.

В дальнейшем Майкельсон усомнился в достаточной точности примененного для измерения расстояния метода триангуляции и в достоверности оценок погрешности от изменения показателя преломления воздуха. В серии опытов 1929—1933 гг. Майкельсон и его сотрудники применяли метод Фуко. После смерти Майкельсона его работы продолжали Пиз и Пирсон. За время с 19 февраля 1931 г. по 27 февраля 1933 г. было произведено более

2800 измерений. Отдельные измерения объединялись в серии. Таким образом, было получено значение скорости света $299\,774 \pm \pm 11$ км/сек. Эта серия работ завершила собой второй период в истории физических методов определения скорости света, начало которого условно можно отнести к первой серии опытов Корню (1872).

В 1925 г. Каролюс сделал попытку заменить вращающееся зубчатое колесо безынерционным электрическим прерыванием света. Применение эффекта Керра в качестве светового реле позволило увеличить частоту прерывания света до миллиона раз в одну секунду. В 1928 г. Каролюс совместно с Миттельштадтом определили скорость света, используя эффект Керра, и получили при этом значение скорости света, равное $299\,788 \pm 20$ км/сек.

В 1937 г. Андерсон, пользуясь методом ячейки Керра и применяя фотоэлемент, получил значение $c = 299\,771 \pm 14$ км/сек. Хюттель (1940), по предложению Каролюса, предпринял новые измерения, Хюттель нашел значение $c = 299\,768 \pm 10$ км/сек. В этих опытах также велика ошибка при определении базы и недостаточно точно определен показатель преломления воздуха. В 1941 г. Андерсон получил значение $c = 299\,776 \pm 14$ км/сек. Бердж произвел анализ всех измерений, произведенных до 1941 г. М. Ф. Романова произвела в 1947 г. анализ измерений скорости света и нашла вероятное значение $c = 299\,791 \pm 13$ км/сек.

Измерить скорости распространения электромагнитных волн радиодиапазона не удавалось, так как результаты измерений содержат неконтролируемое влияние земной поверхности; однако использование микроволнового диапазона для определения c вполне возможно. Джон и Корнфорд (1948) с помощью радиолокационной техники получили для скорости света значения $299\,788$ км/сек, а Аслаксон — значение $299\,792 \pm 1,4$ км/сек.

Эссен и Гордон-Смайк использовали полый резонатор в вакууме: первоначально (1948) ими было получено $c = 299\,793 \pm \pm 9$ км/сек, а затем $c = 299\,792,5 \pm 3$ км/сек. В 1950 г. методом полого резонатора пользовались Хансон и Бол. Маккинли опубликовал результаты измерений (1937—1938) оптическим путем, используя для модуляции двойное лучепреломление в кварце.

В 1954 г. А. И. Карташев разработал метод измерения скорости распространения света с применением специального модулирующего устройства. Им получено значение $c = 299\,788$ км/сек со средней квадратичной погрешностью ± 5 км/сек. На основании анализа результатов измерений им предложено значение скорости распространения света и электромагнитных волн в вакууме $c = 299\,790,2 \pm 1$ км/сек. Маллиган и Мак-Дональд (1957) дали описание четырех методов определения c , разработанных за последние годы: метод микроволнового интерферометра Фрума, метод радиочастотного интерферометра Флормана, метод полосатых спектров, метод определения скорости γ -лучей с помощью

счетчиков, соединенных в схему совпадений. Они получили $c = 299\,792,8$ км/сек с вероятной ошибкой 0,2 км/сек.

Бергstrand (1957) привел пять наиболее точных методов измерения c . Метод стоячих волн ($\lambda = 10$ см) в полном резонаторе (Эссен, Бол, Аслансон), метод микроволнового интерферометра, метод радиочастотного интерферометра (Флорман), метод вращательных ИК-спектров двухатомных молекул и, наконец, метод измерения c помощью гониометра. В 1957 г. Дюпер классифицировал методы измерения как прямые, так и косвенные. К прямым методам измерения он относит: методы измерения групповой скорости или скорости сигнала в воздухе, измерения скорости распространения фазы в вакууме; к косвенным же методам измерения он относит интерференционные измерения скорости распространения фазы. В том же году Кук заново рассмотрел вопрос о вековом изменении скорости света.

Экспериментально до настоящего времени очень трудно получить однозначное значение для скорости света, и принцип постоянства скорости света нельзя рассматривать как прямой результат опыта.

Ритц (1908), Кунц (1900), Комсток (1910) стремились не вводить принцип постоянства скорости света и строить такие варианты релятивистской теории, которые не были бы сопряжены с радикальными изменениями в понимании сущности пространства и времени.

Ритц предполагал, что скорость света определяется как векторная сумма скорости света от неподвижного источника и скорости источника относительно наблюдателя (баллистическая теория). Толмен (1910) и Майорана (1919) предлагали решить этот вопрос на основании наблюдений интерференционных явлений от движущегося источника.

В. де Ситтер выступил в 1913 г. с доказательством неизменности скорости света. В том случае, если бы скорость света зависела от скорости излучающего тела, закономерности движения удаленных двойных звезд оказались бы весьма осложненными. Де Ситтер, отмечает, что теория Ритца потребовала бы допущение, что движение двойных звезд подчиняется не закону тяготения Ньютона, а более сложному закону, в который должно было входить расстояние звезды от Земли.

Де Ситтер ограничился рассмотрением излучения света звезды при приближении последней к наблюдателю и при ее удалении от наблюдателя. Фрейндлих в 1913 г. считал необходимым рассматривать всю видимую траекторию звезды. Однако и результаты наблюдений траекторий визуальных двойных звезд не могут служить прямым экспериментальным доказательством независимости скорости света от скорости движения источника, поскольку отклонения от второго закона Кеплера слишком малы, если бы скорость света и зависела от скорости источника. Изу-

чение доплеровского смещения линий спектрально двойных звезд, а также наблюдения с течением времени изменения их блеска представляют известные возможности для проверки гипотезы Ритца, однако они не в состоянии однозначно решить проблему и не могут заменить прямого эксперимента.

А. М. Бонч-Бруевич впервые поставил прямой опыт, в котором в качестве источников излучения были использованы экваториальные края видимого диска Солнца. Опыт Бонч-Бруевича свидетельствует об отсутствии эффекта, ожидаемого с точки зрения классической теории, и может служить непосредственным подтверждением независимости скорости света от скорости источника. В последние годы А. Г. Баранов предложил опыт по прямой проверке независимости скорости света от скорости источника. Наряду с обсуждением вопроса о независимости скорости света от скорости источника, шла оживленная дискуссия о смысле и содержании постулата постоянства скорости света.

В отличие от Эйнштейна, А. Пуанкаре рассматривал постоянство скорости света в различных направлениях как постулат, без которого нельзя обойтись при измерении скорости света. Этот постулат о постоянстве скорости света, недоступный, согласно Пуанкаре, проверке опытным путем, служит для определения одновременности удаленных событий, при котором законы природы могут быть выражены, наиболее просто.

Вслед за Пуанкаре, Эддингтон писал, что строго говоря, опыты Майкельсона — Морли непосредственно не доказывают, что скорость света постоянна во всех направлениях, но доказывают лишь то, что средняя скорость распространения туда и обратно постоянна во всех направлениях. Эддингтон вслед за Пуанкаре считает, что определение одновременности основано на соглашении о равенстве скорости света в противоположных направлениях. Конвенционалистский характер этого утверждения подчеркивается как Эддингтоном, так и Пуанкаре.

Однако многие авторы (А. Д. Александров, В. А. Фок и др.) справедливо рассматривают определение одновременности Эйнштейна как базирующееся на законе о постоянстве скорости света, содержащее уже положение о равной скорости света в противоположных направлениях.

Конвенционалистская концепция Пуанкаре — Эддингтона не была воспринята большинством исследователей, а ее философская несостоятельность была показана во многих работах.

Августинек [30] указал на противоречие в суждениях Эддингтона. Эддингтон приписывает эйнштейновскому допущению поясняющую функцию по отношению к результатам эксперимента Майкельсона, но тем самым он, разумеется, вступает в противоречие со своей конвенционалистской точкой зрения на одновременность, поскольку мы пользуемся эмпирическими законами и гипотезами и т. д.