

530.12:531.18

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ***Г. М. Страховский, А. В. Успенский*

В 1905 г. Эйнштейн создал специальную теорию относительности. За 60 лет, прошедшие с тех пор, был поставлен ряд экспериментов (со все возрастающей точностью) для проверки ее основных положений и следствий, и сейчас эта теория является общепризнанной. Однако ввиду большой важности специальной теории относительности в печати все время появляются предложения по постановке экспериментов для ее дополнительной проверки (например, <sup>34, 38</sup>). С появлением спутников появились предложения ставить такие эксперименты и на спутниках <sup>18, 32</sup>.

Обычно для обоснования специальной теории относительности указываются эксперименты, проведенные сравнительно давно <sup>36, 37, 6, 29, 43</sup>. Между тем наиболее интересные эксперименты по проверке ее постулатов поставлены в самые последние годы. Мы остановимся на некоторых из них, ограничившись лишь теми, которые ставились или могут быть поставлены в лабораторных условиях. Обширную библиографию по проверке специальной теории относительности с привлечением астрономических наблюдений можно найти в работе <sup>5</sup>.

Эксперименты, о которых будет идти речь ниже, можно было бы разделить на три группы. К первой группе относятся эксперименты, результаты которых несомненны. Это, например, результат эксперимента Майкельсона — Морли (не путать с интерпретацией результата, см. ниже в тексте). В последнее время эксперименты такого типа (доплеровский сдвиг второго порядка <sup>7</sup>, эксперимент с двумя газовыми лазерами <sup>29</sup>) были поставлены с гораздо большей точностью. Кроме того, были поставлены эксперименты, в которых величина релятивистских эффектов очень значительна (зависимость массы от скорости <sup>8, 9</sup>).

Ко второй группе можно было бы отнести эксперименты по проверке независимости скорости света от скорости источника. Здесь до самого последнего времени не было надежных результатов. Более того, были экспериментальные работы Кантора <sup>50</sup> (как выяснилось, ошибочные <sup>51</sup>), из которых следовало, что скорость света зависит от скорости источника.

Недавно были поставлены прямые эксперименты в лабораторных условиях, подтверждающие независимость скорости света от скорости источника <sup>2, 3</sup>.

Наконец, третью группу экспериментов <sup>44, 15, 39, 17</sup> составляют принципиально новые эксперименты по проверке принципа относительности.

Специальная теория относительности опирается на два постулата <sup>1</sup>: 1) принцип относительности, 2) постулат о постоянстве и независимости скорости света от скорости движения источника.

## I. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРОВЕРКЕ НЕЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ СВЕТА ОТ СКОРОСТИ ИСТОЧНИКА

До последнего времени положение о независимости скорости света от скорости источника основывалось на обработке астрономических данных о движении двойных звезд<sup>59, 32</sup>. Интерпретация этих данных не является вполне однозначной<sup>12</sup>. Более надежен эксперимент А. Н. Бонч-Бруевича и В. А. Молчанова (1956 г.)<sup>12</sup> по наблюдению доплер-эффекта от краев солнечного диска.

Прямые эксперименты в лабораторных условиях по проверке постулата независимости скорости света от скорости движения источника были поставлены в 1963 г.<sup>2, 3</sup>.

В первом эксперименте<sup>2</sup> измерялось время пролета до детектора  $\gamma$ -квантов, испускаемых движущимся и неподвижным источниками.

Движущимся источником излучения служило возбужденное ядро углерода ( $^{12}\text{C}^*$ ), а неподвижным — возбужденное ядро кислорода ( $^{16}\text{O}^*$ ). Для получения ядер в возбужденном состоянии мишень из углерода и мишень из кислорода бомбардировались пучком  $\alpha$ -частиц (энергия 14 Мэв) из циклотрона. При столкновении  $\alpha$ -частиц с ядрами в результате реакций  $\text{C}^{12}(\alpha\alpha')\text{C}^{12}$  и  $\text{O}^{16}(\alpha\alpha')\text{O}^{16}$  ядра углерода и кислорода переходили в возбужденное состояние. Возбужденный уровень углерода (4,43 Мэв) обладает периодом полураспада  $6,5 \cdot 10^{-14}$  сек. Это значит, что он распадается мгновенно, пока ядро углерода не успело еще остановиться (при соударении с частицей ядро получает импульс отдачи). Измерение доплеровского смещения показало, что ядро имеет в момент излучения  $\gamma$ -кванта среднюю скорость  $(1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} c$  ( $c$  — скорость света).

Возбужденный уровень кислорода (6,13 Мэв) распадается гораздо медленнее (период полураспада  $1,2 \cdot 10^{-11}$  сек). В результате ядро кислорода сначала останавливается, а потом уже излучает  $\gamma$ -квант (измерение доплеровского смещения подтверждает это).

В эксперименте сравнивалось время пролета  $\gamma$ -квантов от движущегося источника (мишень из углерода) и от неподвижного источника (мишень из кислорода) до детектора. Мишени располагались последовательно на расстоянии 30 см друг от друга, и их легко поменять местами. Обозначим через  $\tau_1$  и  $\tau_2$  промежутки времени между импульсами, приходящими от мишеней на детектор ( $\tau_1$ , скажем, для случая, когда первой стоит мишень из углерода,  $\tau_2$  — для случая, когда мишени меняются местами, т. е. первой стоит кислородная мишень). Если  $\tau_1 = \tau_2$ , то скорость  $\gamma$ -кванта не зависит от движения источника. Если же скорость  $\gamma$ -кванта зависит от скорости источника ( $v_{\text{ист}}$ ) и равна  $V = c + v_{\text{ист}}$ , то

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 = \frac{2Lv_{\text{ист}}}{c^2};$$

$L$  — расстояние до детектора, равное в эксперименте 4 м. Подставляя значения  $L$ ,  $v_{\text{ист}}$ ,  $c$ , получим

$$\Delta\tau = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ сек.}$$

Экспериментально измеренное значение

$$\Delta\tau = (-0,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-9} \text{ сек.}$$

Разберем теперь второй эксперимент<sup>3</sup>.

Здесь для проверки независимости скорости света от скорости источника использовалась аннигиляция позитрона и электрона. В системе центра масс позитрон и электрон движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями, равными примерно  $c/2$ . При аннигиляции рождаются два  $\gamma$ -кванта. Если источник излучения (центр масс электрона и

позитрона) покоится, кванты разлетаются под углом  $180^\circ$  с одинаковой скоростью. Если центр масс электрона и позитрона (источник) движется,  $\gamma$ -кванты разлетаются под углом меньше  $180^\circ$  и величина угла разлета определяется энергией позитрона.

Поставив на пути  $\gamma$ -квантов счетчики, можно рассчитывать на два результата: 1) если верен второй постулат специальной теории относительности, то  $\gamma$ -кванты достигнут счетчиков одновременно (расстояния от точки аннигиляции до счетчиков, конечно, надо сделать одинаковыми); 2) если же второй постулат неверен и скорость света складывается со скоростью источника, то  $\gamma$ -квант, летящий в направлении падающего позитрона, будет иметь скорость больше  $c$ , а  $\gamma$ -квант, летящий в направлении, противоположном направлению падающего позитрона, будет иметь скорость меньше  $c$ . Первый  $\gamma$ -квант тогда быстрее долетит до счетчика, чем второй.

Источником позитронов служила пластинка  $\text{Cu}^{64}$  диаметром 2 см и толщиной 0,1 мм, помещаемая в реактор. Аннигиляция позитронов и электронов происходила в пластинке из органического стекла толщиной 1 мм. Счетчики ставились на расстоянии 60 см от нее. Применялась схема совпадений, и измерялось время пролета  $\gamma$ -квантов от пластинки до счетчиков. Измерения показали, что с точностью до 10% скорость  $\gamma$ -квантов от движущегося источника такая же, как от неподвижного источника.

Результаты двух приведенных экспериментов хотя довольно грубы, но подтверждают второй постулат специальной теории относительности<sup>12</sup>. Они представляют также интерес с точки зрения обоснования общей теории относительности<sup>45</sup>.

Отметим, что по сравнению с астрономическими опытами по проверке второго постулата<sup>5</sup>, в которых используются космические источники со сравнительно малыми скоростями, в приведенных экспериментах скорость источников гораздо выше (сравнима с величиной скорости света).

Как известно, на отказе от второго постулата построена «баллистическая» теория. В основном эта теория связана с именем Ритца<sup>4</sup>. В ней предполагается, что скорость света есть векторная сумма скорости источника и скорости света от неподвижного источника. Очевидно, что приведенные эксперименты служат еще одним веским аргументом против «баллистической» теории (эксперименты к тому же проведены в области частот электромагнитного излучения, в которой не было экспериментов по проверке второго постулата \*).

## II. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРОВЕРКЕ СЛЕДСТВИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Во многих экспериментах проверяются не постулаты, а следствия специальной теории относительности.

Один из них — экспериментальное измерение доплеровского сдвига второго порядка  $\sim (1 - \beta^2)^{-1/2}$ , предсказываемого специальной теорией относительности.

Впервые эксперимент был проведен в 1938 г.<sup>6</sup>, затем в 1939 г.<sup>43</sup>, а в 1961 г. повторен с гораздо большей точностью<sup>7</sup>. В эксперименте молекулярные ионы водорода ( $\text{H}_2^+$  и  $\text{H}_3^+$ ) ускорялись приложенным напряжением (максимальное напряжение 76 кВ) до скорости  $2,8 \cdot 10^8$  см/сек. При соударении ионов с молекулами водорода образовывались быстрые атомы водорода в возбужденном состоянии. Эти атомы излучали. Теория относительности предсказывает, что при наблюдении этого излучения под

\*) Единственный эксперимент, в котором выяснялось, зависит ли скорость  $\gamma$ -квантов от скорости источника, — это работа<sup>41</sup>, но, как показано в работе<sup>42</sup>, результаты, полученные в<sup>41</sup>, не очень ясны.

углом  $\theta$  к направлению движения пучка атомов водорода длина волны излучения равна

$$\lambda_B = \lambda_0 \frac{1 - \beta \cos \theta}{(1 - \beta^2)^{1/2}} \approx \lambda_0 \left( 1 - \beta \cos \theta + \frac{1}{2} \beta^2 \right), \quad (1)$$

$$\lambda_R = \lambda_0 \frac{1 + \beta \cos \theta}{(1 - \beta^2)^{1/2}} \approx \lambda_0 \left( 1 + \beta \cos \theta + \frac{1}{2} \beta^2 \right). \quad (2)$$

Здесь (и в дальнейшем)  $\beta = v/c$ , где  $v$  — скорость пучка (источник излучения),  $\lambda_0$  — длина волны излучения в системе, жестко связанной с движущимся атомом. (Разложение в формулах (1) и (2) возможно, так как  $\beta < 0,01$ .)

Формула (1) справедлива, если пучок движется к наблюдателю, а формула (2), — если пучок движется от наблюдателя.

Разность выражений (2) и (1) дает

$$2\lambda_D = \lambda_R - \lambda_B = 2\lambda_0\beta \cos \theta. \quad (3)$$

Отсюда видно, что, зная  $\lambda_R$ ,  $\lambda_B$ ,  $\lambda_0$  и  $\theta$ , можно определить  $\beta$  (так и делалось в эксперименте).

С другой стороны, складывая выражения (1) и (2), получим, что средняя длина волны

$$\lambda_Q = \frac{1}{2} (\lambda_R + \lambda_B) = \lambda_0 \left( 1 + \frac{\beta^2}{2} \right). \quad (4)$$

Видно, что релятивистское изменение длины волны

$$\delta\lambda_{\text{рел}} = K\lambda_0\beta^2, \quad (5)$$

где  $K = 1/2$ . Экспериментально было показано, что  $K = 0,498 \pm 0,025$ . Это значительно точнее результатов <sup>6</sup>, где ошибка составляла 10—15%.

Второй эксперимент такого типа <sup>8, 9</sup> — это проверка зависимости величины массы от скорости.

Из специальной теории относительности следует, что если частица имеет массу покоя  $m_0$ , то при движении со скоростью  $v$  ее масса возрастает:

$$m = m_0 (1 - \beta^2)^{-1/2}. \quad (6)$$

С другой стороны, между импульсом частицы ( $p$ ), ее массой и скоростью должно выполняться соотношение

$$m = \frac{p}{v}. \quad (7)$$

Сравнение величины массы, получаемой из формул (6) и (7), проводилось в работах <sup>8, 9</sup>. В работе <sup>8</sup> для этого использовался пучок протонов с энергией 660 Мэв. Как видно из формул (6) и (7), чтобы их сравнить, необходимо измерить скорость протона  $v$  и его импульс  $p$ .

Скорость протона оценивалась по углу излучаемого им черенковского излучения (из измерения кривой Брэгга вносилась небольшая поправка).

Для измерения импульса применялась следующая система. Хорошо известно, что если натянутую проволоку, по которой течет ток, поместить в магнитное поле, она изогнется и примет форму, совпадающую с траекторией заряженной частицы в магнитном поле. Натяжение нити обычно производится каким-нибудь грузиком. Если знать вес этого грузика и величину тока, то легко определить импульс частицы, траектория которой совпадает с формой проволочки.

Окончательный вывод, полученный в работе <sup>9</sup>, такой: формулы (6) и (7) согласуются, наблюдаемое относительное отклонение составляет

$$\frac{\Delta m}{m} = 0,004 (1 \pm 0,6).$$

Вообще работ, в которых обсуждаются следствия теории относительности, довольно много. Например, в работе <sup>14</sup> показано, что согласие между экспериментальными измерениями и теоретическим расчетом тонкой структуры атома водорода означает, что формула (6) справедлива с точностью 0,05%.

Интересно отметить, что возрастание массы со скоростью может вообще быть очень значительным. В современных циклических ускорителях \*) электронов при движении электронов со скоростью, близкой к  $c$ , масса электронов может превышать массу покоя протона.

### III. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ТИПА ОПЫТА МАЙКЕЛЬСОНА — МОРЛИ

Опыт Майкельсона — Морли <sup>36, 37</sup> был поставлен в 1887 г., задолго до появления специальной теории относительности, для проверки гипотезы «механического» светоносного эфира. Этот эксперимент сейчас описывается во всех учебниках (например, <sup>35</sup>; там же дается его трактовка, из которой исходили Майкельсон и Морли). Имеется также много хороших популярных статей об этом эксперименте <sup>10, 11</sup>, и нет надобности его описывать.

Результат эксперимента (не путать с интерпретацией, см. ниже) представляется сейчас бесспорным, хотя было предпринято несколько попыток опровергнуть его. Наиболее известны в этом отношении работы Миллера (1925—1926 гг.) <sup>53-55</sup>, в которых при повороте интерферометра обнаружен заметный сдвиг интерференционных полос. Другие исследователи <sup>16, 28, 55-58</sup> ничего похожего на результаты Миллера не получили.

Как известно, Майкельсон и Морли не обнаружили сдвига интерференционных полос и интерпретировали это как отсутствие движения Земли относительно «эфира». Вот как писал об этом Майкельсон Рэлю:

«Мой дорогой лорд Рэлей, эксперименты по относительному движению Земли и эфира закончены, и результат решительно отрицательный. Ожидаемое смещение интерференционных полос от нулевого положения должно было бы быть в 0,40 полосы; максимальное смещение 0,02 и среднее много меньше 0,01...».

Опыт Майкельсона несколько раз повторялся со все возрастающей точностью. В работе <sup>16</sup> уже было показано, что если движение Земли относительно эфира и существует, то со скоростями, меньшими 1,5 км/сек. Последний и наиболее точный эксперимент этого типа был поставлен в 1963 г. на газовом лазере (He — Ne) группой американских физиков <sup>28</sup>.

В основе эксперимента лежат следующие соображения. Частота лазера ( $\nu$ ) с плоскопараллельным резонатором определяется формулой <sup>40</sup>

$$\nu = \frac{\nu_m Q_m + \nu_c Q_c}{Q_m + Q_c}, \quad (8)$$

\*) На примере ускорителя очень наглядным становится положение, что нельзя заставить частицы двигаться со скоростями больше  $c$ . Действительно, нетрудно показать, что

$$\beta^2 = \left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m_0 c^2}{m c^2}\right)^2 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_0}{W}\right)^2.$$

Видно, что при энергии  $W = 10^9$  эв  $v = 0,999999987c$  (для электрона  $W_0 = m_0 c^2 \approx 0,5 \times 10^6$  эв).

где  $\nu_m$  — частота перехода,  $\nu_c = nc/2L$  — частота типа колебаний;  $Q_m = \nu_m/\Delta\nu_m$ , где  $\Delta\nu_m$  — полуширина линии вещества;  $Q_c = \nu_c/\Delta\nu_c$ , где  $\Delta\nu_c$  — полуширина линии резонатора.

Так как обычно  $Q_c \gg Q_m$ , то

$$\nu \approx \nu_c = \frac{nc}{2L} = \frac{nc}{2L_0}$$

Если ось резонатора лазера параллельна скорости ( $v$ ) «эфира», то частота лазера

$$\nu_c(1) = \frac{nc}{2L_0} (1 - \beta^2); \quad (9)$$

если же перпендикулярна, то

$$\nu_c(2) = \frac{nc}{2L_0} (1 - \beta^2)^{1/2}. \quad (10)$$

В установке из двух лазеров, расположенных перпендикулярно друг другу, при повороте на  $90^\circ$  должно наблюдаться изменение частоты:

$$\frac{2[\nu_c(2) - \nu_c(1)]}{\nu_c} = \beta^2$$

(если есть эфир, относительно которого установка движется).

Для  $\nu_c = 3 \cdot 10^{14}$  гц и  $v = 30$  км/сек (скорость орбитального движения Земли), т. е. для  $\beta^2 = 10^{-8}$ , наблюдаемый сдвиг частоты может быть  $\sim 10^6$  гц, т. е. легко замечен.

На точность эксперимента накладывается ограничение: 1) сдвигом частоты из-за спонтанного излучения и 2) изменением  $L$  (тоже меняющим частоту) из-за тепловых флуктуаций.

Спонтанное излучение сдвигает частоту на величину

$$2\delta = \frac{8\pi h\nu}{P(\Delta\nu_c)^2},$$

где  $P$  — мощность генерации,  $h\nu$  — энергия квантов излучения. Типичные значения для газового лазера на смеси He—Ne:  $P = 10^{-3}$  вт,  $\Delta\nu_c/\nu_c = 10^{-8}$  — дают величину  $2\delta$ , равную 0,1 гц.

Изменение  $L$  из-за тепловых флуктуаций может привести к большей ошибке в измерении частоты. Если зеркала резонатора укреплены на держателях в виде цилиндров, то возможный сдвиг частоты

$$2\delta' = 2\nu \left( \frac{2kT}{YV} \right)^{1/2},$$

где  $Y$  — модуль Юнга,  $V$  — объем, а  $T$  — температура держателей. Для типичных значений параметров  $\delta'$  — около 3 гц. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Экспериментальная установка была собрана так. Два лазера помещались на поворотной платформе под прямым углом друг к другу. Для уменьшения влияния вибраций применялась сложная система подвески платформы с оборудованием (вес 200 фунтов) на резиновых шнурах. Поворот платформы осуществлялся приводом из мягкой резины. Благо-

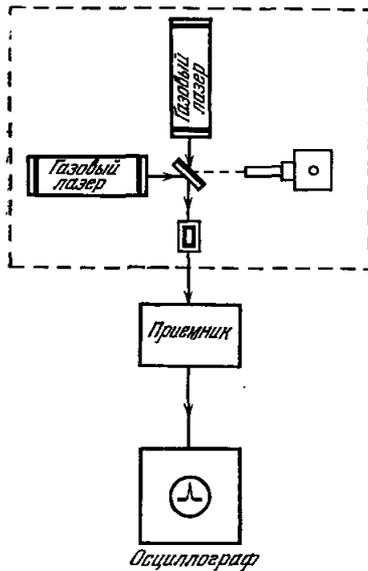


Рис. 1. Схема установки с двумя газовыми лазерами на смеси He—Ne, расположенными под углом  $90^\circ$  друг к другу на поворотной платформе.

На схеме показаны лазеры № 1 и № 2. Штриховой линией обозначена платформа, на которой смонтирована установка.

даря этим мерам удалось сильно уменьшить влияние акустических вибраций. (По-видимому, акустические помехи через воздух преобладали.)

Вывод, который был сделан в результате эксперимента, заключался в том, что не обнаружено движения Земли относительно «эфира», во всяком случае скорость Земли относительно «эфира» не превышает 30 м/сек (это в 45 раз точнее результата Иоса<sup>16</sup>).

И в выводах Майкельсона, и в выводах авторов эксперимента с газовыми лазерами говорится об отсутствии движения Земли относительно «эфира» (т. е. выделенной системы отсчета).

Вообще часто результат экспериментов типа Майкельсона — Морли рассматривают как доказательство принципа относительности, т. е. отсутствия некоторой выделенной системы координат. Это, по-видимому, не так. Результат экспериментов типа Майкельсона — Морли доказывает на самом деле существование релятивистского сокращения длины в движущейся системе координат. Чтобы показать это, дадим таким экспериментам более последовательную трактовку<sup>27</sup> (трактовка самого Майкельсона, перешедшая затем в учебники, не учитывает релятивистского сокращения длины).

Будем исходить из того, что существует система отсчета  $\Sigma$  («покоящаяся» система у Эйнштейна), в которой свет распространяется изотропно и прямолинейно с постоянной скоростью  $c$ .

Для количественной формулировки этого утверждения необходимо предполагать, что наблюдатель в системе  $\Sigma$  имеет «линейку» и «часы», при помощи которых он может измерить временные и пространственные отрезки.

В системе  $\Sigma$  (четырёхмерное евклидово пространство) метрика определяется так:

$$d\sigma^2 = d\tau^2 - \frac{1}{c^2} (d\xi^2 + d\eta^2 + d\zeta^2). \quad (11)$$

Рассмотрим теперь вторую систему отсчета  $S$ ,двигающуюся относительно первой с постоянной скоростью  $v$ . Наблюдателя,двигающегося вместе с системой  $S$ , также естественно снабдить «линейкой» и «часами», чтобы он мог измерять пространственные и временные отрезки в системе  $S$  ( $t, x, y, z$ ).

Не делая никаких предположений о том, как ведет себя скорость света или какой-либо другой физический закон в системе отсчета  $S$ , поставим задачу о нахождении преобразования  $T$  между системами ( $t, x, y, z$ ) и ( $\tau, \xi, \eta, \zeta$ ). Для достаточно близких событий  $T$  можно линеаризовать. Если учесть к тому же, что в преобразовании  $T$  единственным существенным параметром должен являться вектор скорости  $\mathbf{v}$  и при  $v = 0$  системы совпадают, можно показать, что в общем случае метрика в системе  $S$  должна иметь вид

$$d\sigma^2 = g_0^2 dt^2 - \frac{1}{c^2} [g_1^2 dx^2 + g_2^2 (dy^2 + dz^2)], \quad (12)$$

где

$$\left. \begin{aligned} g_0 &= (1 - \beta^2)^{1/2} a_0^0, \\ g_1 &= (1 - \beta^2)^{1/2} a_1^1, \\ g_2 &= a_2^2. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Из постулатов теории относительности следует, что

$$g_0 = g_1 = g_2 = 1.$$

В соотношении (13)  $a_0^0$  — коэффициент преобразования между  $d\tau$  и  $dt$ ,  $a_1^1$  — коэффициент преобразования между  $d\xi$  и  $dx$ , а  $a_2^2$  — коэффициент преобразования между  $d\eta$  и  $y$  (и между  $d\zeta$  и  $z$ ).

Результат эксперимента Майкельсона — Морли можно сформулировать так: полное время, необходимое свету в свободном пространстве, чтобы пройти некоторый путь  $l$  и вернуться обратно, не зависит от направления, по которому распространяется свет.

Время, необходимое свету для прохождения пути  $l$  в свободном пространстве (при распространении света под углом  $h$  к оси  $x$ ), сразу получается, если приравнять  $d\sigma$  нулю. Тогда из уравнения (12) получаем

$$t = \frac{l}{cg_0} (g_1^2 \cos^2 h + g_2^2 \sin^2 h)^{1/2}. \quad (14)$$

Это время не должно зависеть от  $h$ , т. е. должно выполняться условие  $g^1 = g^2$  или

$$a_2^2 = a_1^2 (1 - \beta^2)^{1/2}. \quad (15)$$

Формула означает, что любой предмет в движущейся системе координат сокращается \*) в отношении  $(1 - \beta^2)^{1/2}$ : 1 по сравнению с неподвижной системой координат.

Из результата эксперимента типа Майкельсона — Морли можно также сделать вывод, что средняя скорость света на пути туда и обратно постоянна, но ничего нельзя сказать о независимости скорости (не средней) света от скорости наблюдателя, т. е. о том, справедливы ли принцип относительности или есть выделенная система координат.

По-видимому, вообще в экспериментах второго порядка (ожидаемый эффект пропорционален  $\beta^2$ ; эксперименты типа Майкельсона — Морли тоже являются экспериментами второго порядка) нельзя проверить принцип относительности <sup>33, 52</sup>. Это подчеркивают многие авторы, в том числе А. Эддингтон <sup>47</sup>: «Строго говоря, опыт Майкельсона — Морли не доказывает непосредственно, что скорость света постоянна во всех направлениях; он только говорит о том, что средняя скорость распространения туда и обратно была постоянна во всех направлениях».

Справедлив или нет принцип относительности, можно выяснить из опытов первого порядка (ожидаемый эффект пропорционален  $\beta$ ). Эксперименты первого порядка интересны еще и тем, что в них величины ожидаемых эффектов  $\sim 10^{-4}$ , т. е. гораздо больше, чем в экспериментах второго порядка <sup>13</sup>.

Говоря об опытах первого порядка, мы имеем в виду те эксперименты, в которых можно исследовать независимость скорости света от скорости наблюдателя (а не только независимость от движения источника).

Очевидно, для этой цели непригодны многочисленные опыты интерференционного типа или опыты, в которых путь света замкнут. Для подобных опытов еще Лоренц <sup>48</sup> доказал в общем виде, что они всегда дают нулевой результат.

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПЕРВОГО ПОРЯДКА ПО ПРОВЕРКЕ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Предложения по постановке экспериментов первого порядка для проверки специальной теории относительности все время появляются в печати <sup>13, 19-25, 26, 33</sup>, хотя многие из них при более внимательном подходе оказываются на самом деле — второго порядка <sup>20</sup>.

\*) Интересно отметить, что хотя быстродвижущиеся тела испытывают значительные сокращения в направлении движения, это сокращение невозможно увидеть <sup>46, 49</sup>. Кванты от равноудаленных от глаза или фотопластины точек тела придут на сетчатку глаза или фотопластинку не одновременно. В результате получится искаженное изображение тела. Для движущегося тела это искажение в точности такое, что компенсирует его сокращение. Видимая форма тела не меняется, но кажется, что тело несколько повернулось.

Сейчас поставлено два эксперимента первого порядка и оба они основаны на предложении Мёллера <sup>44</sup>.

Он рассмотрел следующую задачу. Пусть в лабораторной системе координат движется излучатель со скоростью  $u$ , а излучение наблюдателя — в направлении, определяемом вектором  $e$ . Тогда если лабораторная система в свою очередь движется со скоростью  $v$  относительно абсолютной системы отсчета эфира, наблюдатель видит излучение с частотой

$$\nu = \nu_0 \left( 1 + \frac{eu}{c} + \frac{(eu)^2}{c^2} + \frac{vu}{c^2} \right). \quad (16)$$

Посмотрим, как эту формулу можно проверить экспериментально. Первый эксперимент <sup>15, 39</sup> ставился следующим образом. На поворотной станине монтировались два молекулярных генератора. Пучки молекул аммиака, возбуждающие генераторы, были направлены навстречу друг другу. Измерялась частота биений молекулярных генераторов с точностью  $10^{-12}$ .

Если бы существовал «эфир», то при повороте станины на  $180^\circ$  наблюдалось бы изменение частоты биений ( $\Delta\nu/\nu$ ) на  $4vu/c^2$ , где  $u$  — средняя тепловая скорость молекул аммиака, а  $v$  — скорость Земли относительно «эфира».

Действительно, применим к рассмотренной схеме формулу (16), считая, что молекулы аммиака — это движущиеся излучатели, а резонатор — это приемник излучения (наблюдатель). Так как  $eu = 0$  (молекула движется вдоль оси резонатора, а излучает перпендикулярно), из формулы (16) следует, что частота излучения генератора

$$\nu = \nu_0 \left( 1 + \frac{vu}{c^2} \right). \quad (17)$$

Очевидно, для одного генератора член  $vu/c^2$  войдет со знаком плюс, а для другого — со знаком минус (так как направление движения пучков молекул в них разное).

Из формулы (17) следует, что если повернуть станину на  $180^\circ$ , т. е. поменять генераторы местами, то относительная частота биений между ними должна измениться на  $4vu/c^2$ . Этот член, хотя и является величиной второго порядка по скорости света, по отношению к скорости лаборатории ( $v$ ) относительно «эфира» он первого порядка. Если считать, что  $v$  — это скорость Земли ( $30 \text{ км/сек}$ ) и  $u = 0,6 \text{ км/сек}$ , то изменение частоты биений

$$\Delta\nu = 4 \frac{uv}{c^2} \nu_0 \approx 20 \text{ гц.}$$

В соответствии со специальной теорией относительности частота биений при повороте станины на  $180^\circ$  не должна меняться.

Измерения дали систематическое изменение частоты биений  $\pm \frac{1}{20} \text{ гц}$  в день. Серия измерений, проведенная в нерабочие дни, дала систематическое изменение частоты биений всего  $\pm \frac{1}{50} \text{ гц}$ . Эти изменения частоты биений значительно меньше ожидавшихся и связаны, по-видимому, с помехами от работающих установок.

Таким образом, эксперимент с двумя молекулярными генераторами противоречит теории эфира и подтверждает принцип относительности \*).

\*) В начале статьи уже описывался эксперимент типа Майкельсона — Морли с двумя лазерами на смеси He—Ne, также расположенными на поворотной станине, причем утверждалось, что эксперимент лишь подтверждает релятивистское сокращение длины и не дает возможности ответить на вопрос, есть эфир или нет. Дело в том, что частота лазера на смеси He—Ne определяется частотой резонатора (его длиной  $L$ ), а частота молекулярного генератора определяется частотой перехода. Поэтому эксперимент с газовыми лазерами относится к опытам второго порядка и существенно отличается от эксперимента с молекулярными генераторами.

Эти выводы, однако, вызвали серьезные возражения<sup>23</sup>. Они сводились к тому, что система «молекула и резонатор» не эквивалентна молекуле, излучающей в свободном пространстве, и приемнику излучения. В работе<sup>23</sup> сделан вывод, что результат эксперимента с двумя молекулярными генераторами должен быть отрицательным вне зависимости от того, есть эфир или его нет. В дискуссии принял участие и Мёллер<sup>13</sup>, выступивший с более тщательным обоснованием эксперимента, и нашел, что эксперимент подтверждает принцип относительности.

Второй эксперимент первого порядка по проверке принципа относительности<sup>17</sup> основан на эффекте Мёссбауэра. Источник  $\gamma$ -квантов (фольга из  $\text{Co}^{57}$  в  $\text{Fe}^{56}$ ) и поглотитель (фольга из чистого железа (2%  $\text{Fe}^{57}$ ) располагались на противоположных концах быстро вращающегося стержня (скорость вращения стержня либо 100 об/сек, либо 600 об/сек).

Стержень помещался в стеклянный сосуд, из которого выкачивался воздух. Сосуд имел окошко, за которым ставился счетчик.

Интерпретируем возможный результат эксперимента, следуя Мёллеру<sup>13</sup>. Для этого формулу (16) надо несколько обобщить, так как движется и источник, и приемник (поглотитель). Мёллер показал, что если есть эфир и источник и поглотитель расположены на одинаковых расстояниях от оси вращения, частота  $\nu_a$ , которую «видит» поглотитель, определяется формулой (17). При вращении стержня скалярное произведение  $\mathbf{v}\mathbf{u}$  меняется от нуля до  $|\mathbf{v}||\mathbf{u}|$ , в соответствии с этим должна меняться частота  $\nu_a$ . Изменение частоты должно резко менять поглощение, что можно фиксировать счетчиком.

По теории же относительности  $\nu_a = \nu_0$  и не меняется вне зависимости от скорости вращения.

Эксперимент не обнаружил изменения частоты излучения и, следовательно, эфира, точнее, — не обнаружил движения Земли относительно эфира по крайней мере со скоростями больше 17 м/сек.

Нетрудно видеть, что хотя два приведенных выше эксперимента являются экспериментами первого порядка (см. формулу (17)), ожидаемый эффект пропорционален  $1/c^2$ . Было бы полезно поставить эксперименты, в которых ожидаемые эффекты пропорциональны  $1/c$ .

Например, проект такого эксперимента первого порядка содержится в<sup>30, 31</sup>. В нем предполагается провести измерение разности фаз колебаний двух несинхронизированных молекулярных генераторов, расположенных на расстоянии в несколько метров друг от друга на поворотной станине. Разность фаз генераторов, помещенных на расстоянии  $L$ , равна

$$\varphi = \omega t = 2\pi \frac{L}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{c_{\text{фаз}}}{\nu},$$

Если относительная скорость распространения сигнала (скорость света) зависит от скорости приемника (наблюдателя), то при изменении направления движения изменится разность фаз. По специальной теории относительности изменения разности фаз не должно быть. Изменения направления движения можно добиться поворотом станины на  $180^\circ$ . Величина эффекта зависит от первой степени  $\beta$ . Действительно, разность времен между распространением туда и обратно:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{t_1 - t_2}{t} = \frac{\frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v}}{t} = 2 \frac{\beta}{1-\beta^2} \approx 2\beta.$$

Соответствующее этой разности изменение фазы  $\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = 2\beta$ , или  $\Delta\varphi = 2\beta\varphi = 2\beta \cdot 2\pi \frac{L}{\lambda}$ . Для  $\lambda = 1,25$  см,  $L = 12,5$  м и  $\beta = 10^{-4}$  ( $v$  — берется равной 30 км/сек — орбитальная скорость Земли) получим  $\Delta\varphi = 0,4\pi$ .

Эту разность фаз можно измерить, используя схему рис. 2. В схеме используются три молекулярных генератора (третий — вспомогательный). Разность фаз двух основных молекулярных генераторов может быть измерена по фигуре Лисажу на осциллографе. При повороте установки фигура Лисажу изменит свою форму, если скорость света зависит от скорости лаборатории по отношению к эфиру.

Для постановки опыта необходима высокая относительная стабильность двух молекулярных генераторов. За время поворота станины разность фаз молекулярных генераторов не должна заметно измениться.

Отсюда получаем требование на стабильность частоты

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta\Phi}{\omega t} < \frac{0,4\pi}{2\pi \cdot 10^{10} \cdot 10} = 10^{-12}$$

(время поворота подставки взято равным 10 сек). Точность опыта можно повысить, применив для связи между генераторами волновод, в котором волны распространяются с замедленной фазовой скоростью.

Аналогичный эксперимент предлагается в <sup>19</sup>, но, так как установку предполагается собрать на лазерах, можно сделать ее габариты значительно меньше ( $L = 30$  см) и, следовательно, применить экранирование.

Из других предложений следует отметить <sup>33</sup>, где предполагается использовать эффект Мёссбауэра.

Подводя итог современному состоянию экспериментальной проверки специальной теории относительности, следует сказать, что существование релятивистских эффектов (сокращение длины, замедление времени, возрастание массы и др.) достаточно надежно установлено. Собственно говоря, сомневаться в них — это все равно, что сомневаться в существовании атомной энергии или в ускорителях элементарных частиц. (В основе конструирования ускорителей лежит специальная теория относительности.) С количественной точки зрения было бы, конечно, полезно поставить прямые эксперименты по проверке постулата независимости скорости света от скорости источника с большей точностью. Ввиду большой важности принципа относительности желательно также поставить и другие прямые эксперименты по проверке этого принципа, в частности такие, в которых скорость света входила бы не квадратично, а линейно.

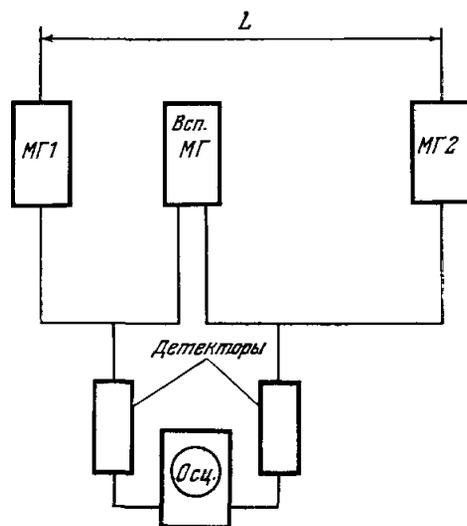


Рис. 2. Схема установки для постановки опыта первого порядка по проверке специальной теории относительности.

На схеме показаны два молекулярных генератора (МГ1 и МГ2) и вспомогательный молекулярный генератор (Всп. МГ).

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. E i n s t e i n, Ann. d. Phys. 17, 891 (1905).
2. T. A l v ä g e r, A. N i l s s o n, J. K j e l l m a n, Nature 197, 1191 (1963).
3. D. S a d e h, Phys. Rev. Letts. 10, 271 (1963).
4. W. R i t z, Ann. de chim. et phys. 13, 145 (1908).
5. А. М. Б о н ч - Б р у е в и ч, В. А. М о л ч а н о в, Опт. и спектр. 1, 113 (1956).

6. H. E. Ives, G. R. Stilwell, *JOSA* **28**, 215 (1938); *JOSA* **31**, 369 (1941).
7. H. I. Mandelberg, L. Witten, *JOSA* **52**, 529 (1962).
8. В. П. Зрелов, А. А. Тяпкин, П. С. Фараго, *ЖЭТФ* **34**, 555 (1958).
9. D. J. Grove, I. C. Fox, *Phys. Rev.* **90**, 378 (1953).
10. R. S. Shankland, *Scient. Amer.* **211** (15), 107 (1964).
11. R. S. Shankland, *Amer. J. Phys.* **32**, 16 (1964).
12. А. Г. Молчанов, *УФН* **83**, 753 (1964).
13. C. Møller, *Proc. Roy. Soc.* **A270**, 306 (1962).
14. P. S. Farago, L. Jonesy, *Nuovo cimento* **5**, 1411 (1957).
15. J. P. Cedarholm, G. F. Bland, W. W. Havens, Jr., C. H. Townes, *Phys. Rev. Letts.* **1**, 342 (1958).
16. G. Joos, *Ann. d. Phys.* **7**, 385 (1930).
17. D. C. Champney, P. B. Moon, *Proc. Phys. Soc.* **77**, 350 (1961).
18. R. Gerhartz, *Proc. IEEE* **52**, 218 (1964).
19. C. W. Carnahan, *Proc. IRE* **50**, 1976 (1962).
20. P. F. Smith, *Proc. IRE* **50**, 1999 (1962).
21. P. M. Rapier, *Proc. IRE* **49**, 1322 (1961).
22. M. Rederfur, *Proc. IRE* **48**, 1661 (1960).
23. C. W. Carnahan, *Proc. IRE* **49**, 1576 (1961).
24. P. M. Rapier, *Proc. IRE* **50**, 229 (1962).
25. M. Rederfur, *Proc. IRE* **50** (3), part 1, 325 (1962).
26. A. C. Schroeder, *Proc. IRE* **50**, 2112 (1962).
27. H. P. Robertson, *Rev. Mod. Phys.* **21** (3), 378 (1949).
28. T. S. Jaseja, A. Javan, J. Murruy, C. H. Townes, *Phys. Rev.* **133** (5A), 1221 (1964).
29. R. J. Kennedy, E. M. Thorndike, *Phys. Rev.* **42**, 400 (1932).
30. Г. М. Страховский, Доклад на Ломоносовских чтениях в МГУ, 1958.
31. И. Г. Басов, О. Н. Крохин, А. Н. Ораевский, Г. М. Страховский, Б. М. Чихачев, *УФН* **75**, 3 (1961).
32. P. Moon, D. Spenser, *JOSA* **43**, 625 (1953).
33. M. Rederfur, *Phys. Rev. Letts* **5**, 191 (1960).
34. S. D. Softky, R. K. Fquire, *J. Geophys. Res.* **65**, 619 (1960).
35. P. Вуд, *Физическая оптика*, М.—Л., ОНТИ, 1936.
36. A. A. Michelson, *Amer. J. Sci.* **22**, 20 (1881).
37. A. A. Michelson, E. W. Morley, *Amer. J. Sci.* **34**, 333 (1887).
38. W. G. Rosser, *Nature* **190**, 249 (1961).
39. J. P. Cedarholm, C. H. Townes, *Nature* **184**, 1350 (1959).
40. С. Н. Townes, *Advances in Quantum Electronics*, Columbia Univ. Press, New York, 1961, стр. 3.
41. D. Lucky, J. W. Well, *Phys. Rev.* **85**, 1060 (1962).
42. J. G. Fox, *Amer. J. Phys.* **30**, 297 (1962).
43. G. Otting, *Phys. Zs.* **40**, 681 (1939).
44. C. Møller, *Suppl. Nuovo cimento* **6**, 381 (1957).
45. В. Л. Гинзбург, *УФН* **81**, 739 (1963).
46. J. Torregel, *Phys. Rev.* **116**, 1041 (1959).
47. А. С. Эдингтон, *Теория относительности*, М.—Л., ОПТИ, 1934, стр. 38.
48. Г. Ч. Лорентц, *Теория электронов*, М.—Л., Гостехиздат, 1953, стр. 261.
49. В. Вайскопф, *УФН* **89**, 183 (1964).
50. W. Kantor, *JOSA* **52**, 978 (1962).
51. G. C. Vabsovsk, T. G. Bergman, *JOSA* **54**, 147 (1964).
52. E. M. Kelly, *Science* **144** (№ 3625), 1450 (1964).
53. D. C. Miller, *Proc. Natl. Acad. Washington* **11**, 307 (1925) (см. перевод: *УФН* **5**, 177 (1925)).
54. D. C. Miller, *Science* **63**, 433 (1926).
55. С. И. Вавилов, *Экспериментальные основания теории относительности*. Собр. соч., т. 4. М., Изд-во АН СССР, 1956.
56. R. J. Kennedy, *Proc. Natl. Acad. USA* **12**, 621 (1926).
57. A. Piccard, E. Stahel, *Compt. rend.* **183**, 420 (1926).
58. A. Piccard und E. Stahel, *Naturwiss.* **15**, 140 (1927); *Compt. rend.* **184**, 451 (1927).
59. W. De-Sitter, *Phys. Zs.* **14**, 429, 1267 (1913).