

Рязанов М. С.

510 гр.

**Об экспериментальной проверке  
второго постулата  
частной теории относительности**

2003

# 1. Введение

Появлению частной теории относительности предшествовали работы Фойхта, Лармора, Лоренца, Фитцджеральда и Пуанкаре. Большая заслуга Эйнштейна заключается в осознании её физического смысла и формировании собственно как теории относительности. В своей знаменитой работе [1] он показал, что все наблюдаемые оптические и электродинамические явления, которые сейчас назвали бы релятивистскими, можно объяснить, используя всего лишь два предположения:

**Первый постулат.** Принцип относительности справедлив не только для механических, но также и для любых других законов (оптических и электродинамических в то время).

**Второй постулат.** Свет в пустоте всегда распространяется с определённой скоростью, не зависящей от состояния движения источника.

В отличие от первого, второй постулат ко времени выхода этой работы не имел непосредственных экспериментальных подтверждений, и о верности теории можно было судить лишь по подтверждению её следствий.

Частная теория относительности привела к радикальному пересмотру понятий о пространственном и временном описании событий. В связи с этим Стюартом, Толменом, Томсоном, Комстоком, Кунцем и другими были сделаны попытки отказаться от принципа постоянства скорости света и, сохраняя только принцип относительности, построить последовательную систему физических воззрений, согласующихся с опытом и вместе с тем не приводящих к пересмотру понятий пространства и времени. В этих теориях («истечения» или «баллистических») предполагалось, что скорость света постоянна только относительно источника. Наибольшего успеха в разработке подобной теории добился Ритц, даже построивший в её рамках систематическую электродинамику и пытавшийся применить к теории тяготения. Однако, все подобные теории сталкивались с теми или иными трудностями.

Несмотря на блестящее подтверждение следствий частной теории относительности и широкое её применение, вопрос о прямой экспериментальной проверке постулатов, лежащих в её основе, представляет значительный теоретический интерес. Проверки второго постулата начались вскоре после появления работы Эйнштейна и продолжают до настоящего времени.

## 2. Общие замечания

Проверка постоянства скорости света требует самого измерения этой скорости или, по крайней мере, сравнения скоростей. При измерениях на замкнутых световых путях, как было показано Эренфестом [2], разница проявляется лишь во втором порядке по величине  $v/c$ , то есть подобные эксперименты требуют достаточно большой точности измерений. Для эффектов первого порядка необходимо использовать разомкнутые пути, но при этом появляется необходимость иметь двое синхронно идущих часов, что тоже связано с определёнными трудностями.

## 3. Наблюдения двойных звёзд

Ещё в 1879 г. Максвеллом было предложено использовать для проверки постоянства скорости света затмения спутников Юпитера (по которым Рёмером в 1675 г. впервые была определена сама скорость света). В качестве одних из часов здесь выступает периодическое движение спутников. Однако, исследование этого вопроса Бэртоном [3] в 1910 г. показало, что необходимая точность астрономических наблюдений недостижима.

В то же время Комсток [4] указал на возможные эффекты при наблюдении двойных звёзд. Если бы скорость света зависела от скорости источника, то наблюдаемые закономерности движения отдалённых двойных звезд оказались бы сильно осложнёнными. В 1913 году Де Ситтер [5] проанализировал результаты астрономических наблюдений двойной звезды из созвездия Возничего с почти круговой орбитой (эксцентриситет эллипса равен 0,005) и средней скоростью движения 110 км/с и доказал, что зависимость вида  $c' = c + v$  опровергается этими астрономическими наблюдениями, а если даже зависимость скорости света от скорости источника существует и имеет вид  $c' = c + kv$ , то из этих астрономических наблюдений следует, что  $k < 0,002$ . Дальнейшие работы [6, 7] усилили эту оценку до  $k < 10^{-6}$ .

В 1953 г. Муун и Спенсер [8] продемонстрировали, что при определённых предположениях о кривизне астрономического пространства время, необходимое свету для преодоления расстояния от двойных звёзд до Земли, существенно сокращается, и эффект становится ненаблюдаемым. Таким образом, работы подобного типа вследствие астрономических масштабов явления оставляют возможность для сомнений в однозначности

их результатов.

## 4. Эксперимент Майораны

Одной из первых попыток проверить справедливость второго постулата в лабораторных условиях был эксперимент Майораны 1918 года [9]. В эксперименте измерялась величина сдвига интерференционных полос в интерферометре Майкельсона с неравными плечами при замене неподвижного источника света на источник света, движущийся со скоростью около 80 м/с. Значимого сдвига полос обнаружено не было, но поскольку использовались замкнутые пути света, разрешающей способности было недостаточно для однозначного вывода о независимости скорости света от движения источника.

## 5. Наблюдения вращения Солнца

В 1954 г. Бонч-Бруевич и Молчанов провели эксперимент [10] по сравнению скоростей света, испущенного противоположными краями экватора Солнца. Экваториальная линейная скорость вращения Солнца хорошо известна из наблюдений доплеровского смещения спектральных линий и равна приблизительно 2 км/с. (Формулы для эффекта Доплера в теории Ритца и при классическом рассмотрении совпадают в первом порядке с выводом частной теорий относительности.) Поэтому переход от излучения восточного к излучению западного экваториальных краёв Солнца соответствует изменению скорости излучателя в плоскости эклиптики на величину порядка 0,001% от скорости света.

Разница скоростей света, испущенного приближающимся и удаляющимся краями экватора Солнца, измерялась на базе длиной 2000 м, чему должна была соответствовать разница времён прохождения  $\Delta t \approx 9 \cdot 10^{-11}$  с. Для измерения столь малого времени свет от противоположных краёв Солнца поочередно направлялся на базу через модулирующее устройство, периодически изменяющее его интенсивность с частотой 12,4 МГц. Фазы модуляции до и после прохождения базы сравнивались точным фазометром. При прохождении светом 2 км по открытой местности наблюдались довольно большие беспорядочные колебания показаний фазометра, поэтому было сделано свыше 1700 измерений (с переходом от одного края Солнца к другому и обратно). Статистическая обработка их показала, что  $\Delta t = (1,4 \pm 3,5) \cdot 10^{-12}$  с, что согласуется с постоянством

скорости света ( $\Delta t = 0$ ) с подавляюще большей вероятностью, чем с предсказанием баллистической теории.

## 6. Возражение Фокса

В 1961 г. Фокс в работе [11] высказал возражение, ставящее под сомнение результаты всех предыдущих экспериментов. Заключалось оно в том, что по теории дисперсии скорость света в веществе определяется интерференцией падающей волны со вторичной, переизлучённой электронами вещества. В результате вся падающая волна поглощается в тонком приграничном слое, и дальше распространяется уже волна, связанная с самим веществом. Таким образом, скорость прошедшего через среду света определяется не скоростью исходного источника, а скоростью среды, через которую свет прошёл. Согласно расчётам, затухание первичной волны происходит на длине порядка  $10^{-4}$  см в конденсированных средах и порядка 1 мм в воздухе при атмосферном давлении.

Так, в эксперименте Майораны интерферометр находился в воздухе, а свет от источника к тому же проходил через стекло делительного зеркала на самом входе в интерферометр, то есть зависимость скорости света от движения источника в любом случае не могла быть обнаружена.

При наблюдениях Солнца с поверхности Земли вся информация о скорости света также теряется при прохождении толстого слоя атмосферы.

Относительно наблюдений двойных звёзд такого простого замечания сделать нельзя, поскольку разница в скорости должна сказываться при прохождении расстояния от звёзд до Земли, где пространство с большой точностью можно считать свободным от вещества. Однако, астрономические исследования показали, что тесные двойные звёзды окружены общей газовой оболочкой, которой может быть вполне достаточно для переизлучения света с выравниванием скоростей света от компонент системы в непосредственной от неё близости.

В этой же статье упоминается об эксперименте [12], в котором наблюдались  $\gamma$ -кванты, излучаемые тормозящимися с 310 МэВ до 170 МэВ электронами. Фотоны высоких энергий (140 МэВ в данном случае) слабо взаимодействуют с воздухом, поэтому переизлучения, влияющего на их скорость можно не опасаться. Было получено значение скорости  $\gamma$ -излучения  $2,97 \cdot 10^{10}$  см/с  $\pm 1\%$ . Хотя скорость электронов таких энер-

гий очень близка к скорости света, излучает не сам электрон, а система, образованная электроном и покоящимся ядром, с которым он сталкивается. Скорость же центра масс системы значительно меньше скорости света, и указанной экспериментальной точности оказывается не достаточно для вывода о постоянстве скорости света.

## 7. Эксперимент Кантора

В том же 1961 г. Кантор поставил оптический эксперимент [13], основанный на указанном выше предположении теории дисперсии. В плечи интерферометра вводились тонкие стеклянные пластинки, движущиеся в противоположные стороны со скоростью до 47 м/с. Скорость света, обогатившего интерферометр в противоположных направлениях, должна была увеличиваться или уменьшаться на величину скорости пластинок. После прохождения 118 см пучки интерферировали, и по сдвигу полос можно было определить разность скоростей.

Для приведённых условий сдвиг интерференционных полос должен был составлять 0,74 их ширины. По словам автора, наблюдался сдвиг в примерно 0,5 полосы, что в формуле  $c' = c + kv$  соответствует  $k = 2/3$ . Для исследования влияния побочных эффектов (увлечения пластинками воздуха, механических вибраций и т. п.) в пути света вводились тонкие лавсановые плёнки, после чего сдвиг полос, как и ожидалось, исчезал. В статье подробно рассматриваются возможные причины сдвига, и делается вывод, что второй постулат частной теории относительности неверен.

В то же время, из результатов наблюдений приводится только одна фотография полос при движущихся пластинках, по которой никаких заключений о сдвиге сделать нельзя. Более того, поскольку весь интерферометр находился в воздухе, эксперимент нельзя считать состоятельным по тем же указанным Фоксом соображениям. Что за эффект наблюдался, так и осталось загадкой, однако, интерес к проверке второго постулата резко возрос, и в следующие несколько лет было проведено достаточно много различных экспериментов по проверке второго постулата.

## 8. Эксперимент Джеймса и Штернберга

В 1963 г. Джеймс и Штернберг решили проверить результат Кантора на более простой установке [14]. Полукруглый стеклянный диск вращался электродвигателем вокруг собственной оси со скоростью 14 300 оборотов в минуту ( $\omega = 1\,500\text{ с}^{-1}$ ). Через диск, перпендикулярно оси его вращения, пропускался коллимированный пучок света.

Если бы вращение диска оказывало влияние на скорость проходящего через него света, фронт выходящей волны должен был искажаться, вызывая отклонение пучка на угол порядка  $20''$  (увлечение света движущимся стеклом даёт эффект порядка  $0,0008''$ , которым можно пренебречь). На расстоянии 20 м от диска располагался телескоп, с помощью которого можно было оценить отклонение с точностью до  $0,5''$ . Во время эксперимента никакого смещения прошедшего через диск пучка относительно не прошедшего обнаружено не было, из чего был сделан вывод, что  $k < 0,025$ . Таким образом, результат Кантора не подтвердился.

## 9. Эксперимент Бабкока и Бергмана

Дальнейшие оптические эксперименты проводились уже в вакууме для исключения влияния возможного переизлучения воздуха.

В 1964 г. Бабкок и Бергман в эксперименте [15] фактически повторили эксперимент Кантора, но разместили всю установку в вакууме. Также был увеличен проходимый светом путь. Скорость движения источника света в эксперименте составляла 50 м/с.

Получив в 240 раз меньшее смещение интерференционных полос, чем смещение, вытекающее из зависимости  $c' = c + v$ , Бабкок и Бергман сделали вывод, что зависимость скорости света от скорости движения источника отсутствует, а опыт Кантора был ошибочным.

## 10. Эксперимент Бекмана и Мендикса

В эксперименте Бекмана и Мендикса 1965 года [16], также проводившемся в вакууме, в качестве движущегося источника использовалось плоское зеркало, закреплённое на роторе гироскопа. В этом эксперименте фотографировалась интерференционная картина, образующаяся при наложении друг на друга пучка света, отразившегося толь-

ко от движущегося зеркала, с пучком, отразившимся последовательно от движущегося зеркала и от неподвижного зеркала Ллойда.

При этом для облегчения измерения малого сдвига интерференционных полос, который мог бы образоваться при наличии зависимости скорости света от скорости движения зеркала, на один полукадр фотоплёнки фотографировалась интерференционная картина, образовавшаяся при вращении ротора гироскопа с закреплённым на нём зеркалом в одну сторону, а на второй полукадр фотоплёнки (с небольшим перекрытием первого полукадра) фотографировалась интерференционная картина, образовавшаяся при вращении ротора гироскопа в противоположную сторону с той же самой по абсолютной величине угловой скоростью.

Расстояние от движущегося зеркала, закреплённого на роторе гироскопа, до фотопленки, на которой формировалась интерференционная картина, в этом эксперименте было равным 4,25 м. Скорость вращения ротора гироскопа доводилась до величины, соответствующей линейной скорости движения зеркала 50 м/с. Никакого смещения интерференционных полос в эксперименте обнаружено не было.

## 11. Излучение ядер отдачи

В 1963 г. группа исследователей во главе с Альвагером провела эксперимент [17] по сравнению скоростей  $\gamma$ -квантов, излучённых неподвижными и движущимися возбуждёнными ядрами. Мишени из изотопов углерода  $C^{12}$  и кислорода  $O^{16}$  бомбардировались  $\alpha$ -частицами, ускоренными в циклотроне до энергии 14 МэВ. В результате бомбардировки получались возбуждённые ядра с некоторой скоростью отдачи.

Возбуждённые ядра углерода с временем жизни  $6,5 \cdot 10^{-14}$  с успевали излучить  $\gamma$ -кванты с энергией 4,43 МэВ до своей остановки, обладая скоростью  $(1,75 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}c$ , измеренной по доплеровскому смещению частоты излучения. Ядра кислорода с временем жизни  $1,2 \cdot 10^{-11}$  с излучали  $\gamma$ -кванты с энергией 6,13 МэВ практически после остановки (доплеровский сдвиг обнаружен не был, эффективная скорость по расчётам составляла  $0,3 \cdot 10^{-2}c$ ).

Излучённые  $\gamma$ -кванты принимались двумя детекторами: первый детектор располагался на расстоянии 0,8 м от мишеней, второй — на одной линии с первым на расстоянии 5 м от мишеней. Мишени располагались на расстоянии 30 см друг от друга, и их

можно было достаточно быстро менять местами. Введением между мишенями и детекторами толстого свинцового поглотителя было показано, что интенсивность попадавших на детекторы рассеянных  $\gamma$ -квантов составляет менее 1%.

В эксперименте измерялось время пролёта  $\gamma$ -квантов между детекторами. Если бы скорость излучения складывалась со скоростью ядер, разница времён пролёта при разных положения мишеней должна была составить 0,42 нс. По результатам обработки измерений была получена в 10 раз меньшая величина, лежащая в пределах экспериментальной погрешности, чему соответствует  $k = 0,1 \pm 0,1$ .

## 12. Аннигиляция позитронов с электронами

В том же году Саде был поставлен эксперимент [18]. В этом эксперименте пучок позитронов направлял на мишень толщиной 1 мм из органического стекла, в которой происходила аннигиляция позитронов с электронами атомов мишени. Образовавшиеся при аннигиляции два  $\gamma$ -кванта в системе центра масс позитрона и электрона разлетаются под углом  $180^\circ$ , а в лабораторной системе отсчета — под меньшим углом, зависящим от импульса позитрона.

Два детектора  $\gamma$ -квантов располагались на одинаковом расстоянии 60 см от мишени по направлениям, составлявшим углы в  $12^\circ$  и  $135^\circ$  с направлением налетающего пучка позитронов. При таких условиях детекторы фиксировали только те  $\gamma$ -кванты, которые образовывались при строго определённой скорости движения центра масс системы электрон-позитрон, равной примерно 0,6*c*. Специальная электронная схема позволяла измерять разницу во времени регистрации  $\gamma$ -квантов этими двумя детекторами с точностью 0,2 нс.

В пределах ошибок измерений никакой разницы во времени зарегистрировано не было, в то время как при существовании зависимости  $c' = c + v$  между моментами попадания  $\gamma$ -квантов в детекторы должен был наблюдаться временной промежуток 2,2 нс. Таким образом, эксперимент Саде опять подтвердил отсутствие зависимости скорости света от движения источника.

### 13. Распад $\pi^0$ -мезонов

В 1964 г. по аналогичной схеме был проведён эксперимент Филлипаса и Фокса [19] (предложенный Фоксом ещё в статье [11]. Там же был предложен и предыдущий эксперимент с позитронами). В данном случае проверялась одновременность попадания  $\gamma$ -квантов, рождавшихся при распаде нейтральных  $\pi$ -мезонов, в детекторы, равноудаленные от точки, в которой  $\gamma$ -кванты рождались. Отсутствие зависимости скорости света от скорости движения источника было доказано с ещё большей степенью достоверности.

В том же году группой Альвагера был осуществлен эксперимент [20] на Женевском протонном синхротроне. В эксперименте измерялась скорость  $\gamma$ -квантов, рождавшихся при распадах нейтральных  $\pi$ -мезонов. Генерация  $\pi^0$ -мезонов производилась бомбардировкой неподвижной бериллиевой мишени протонами с энергией 19,2 ГэВ. В эксперименте использовались  $\gamma$ -кванты, летящие под углом около  $6^\circ$  к направлению полёта протонов.

На пути  $\gamma$ -квантов, вылетающих из бериллиевой мишени, устанавливались два отклоняющих магнита вблизи мишени и один отклоняющий магнит на расстоянии около 50 м от неё. Магниты предназначались для отклонения заряженных частиц, рождавшихся при бомбардировке протоном мишени, с траектории полёта  $\gamma$ -квантов. Перед третьим отклоняющим магнитом на траектории пучка располагался свинцовый коллиматор диаметром 5 мм. После третьего отклоняющего магнита  $\gamma$ -кванты проходили сквозь окно в бетонной стене, которая имела толщину порядка 6 м, и попадали в детектор, в состав которого входили установленные друг за другом большой сцинтилляционный детектор, пластина свинца толщиной 4 мм, малый сцинтилляционный детектор и черенковский детектор.

Большой сцинтилляционный детектор служил для исключения регистрации заряженных частиц методом антисовпадений. Пластина свинца толщиной 4 мм предназначалась для превращения  $\gamma$ -квантов высоких энергий в электрон-позитронные пары, которые регистрировались малым сцинтилляционным детектором. Момент появления импульса на выходе малого сцинтилляционного детектора принимался за момент попадания  $\gamma$ -кванта в этот составной детектор. Черенковский детектор служил для отбора  $\gamma$ -квантов с энергией выше 6 ГэВ.

Измерение скорости  $\gamma$ -квантов осуществлялось времяпролётным методом при помощи только одного детектора. Только один детектор использовался для того, чтобы

устранить возможные возражения о том, что попадающие во второй детектор  $\gamma$ -кванты являются  $\gamma$ -квантами, переизлучёнными веществом первого детектора (покоящимся относительно второго детектора), а не  $\gamma$ -квантами, излучёнными движущимся с большой скоростью источником. Чтобы обеспечить измерение скорости с использованием лишь одного детектора  $\gamma$ -квантов, использовался эффект группирования ускоряемых в протонном синхротроне протонов в компактные сгустки. Эти сгустки протонов бомбардировали бериллиевую мишень с периодом 105 нс, причём время бомбардировки мишени одним сгустком составляло несколько наносекунд. Для сохранения сгустковой структуры ускоряемого пучка протонов на время порядка 100 мс (в каждом цикле ускорения), в течение которого сгустки неоднократно бомбардировали мишень, частота ускоряющего электромагнитного поля поддерживалась постоянной и равной  $9,53220 \pm 0,00005$  МГц.

Детектор можно было помещать в любую точку участка траектории  $\gamma$ -квантов длиной порядка 32 м, расположенного за окном в бетонной стене. Импульсы с детектора сравнивались с фазой ускоряющего напряжения синхротрона, и перемещением детектора добивались изменения задержки на полный период обращения сгустка в синхротроне. По смещению детектора и известной частоте ускоряющего напряжения для скорости  $\gamma$ -квантов было получено значение  $(2,9977 \pm 0,0004) \cdot 10^8$  м/с, что прекрасно согласуется со скоростью света в вакууме. Поскольку скорость распадавшихся  $\pi^0$ -мезонов, служивших источником  $\gamma$ -квантов, должна была составлять  $0,99975c$ , отсюда был сделан вывод, что  $k = (-3 \pm 13) \cdot 10^{-5}$ .

## 14. Наблюдение $\gamma$ -всплесков

В последнее время большое внимание уделяется  $\gamma$ -всплескам космического излучения, идущим от сильно удалённых источников и возникающим, видимо, при взрывах каких-либо объектов.

При этом излучение идёт к Земле как от ближайшей стороны расширяющегося объекта, так и от его удаляющейся стороны. Если бы скорость света зависела от скорости источника, то после длительного внегалактического движения  $\gamma$ -излучение достигло бы Земли в виде протяжённого во времени импульса. Однако, на практике наблюдаются очень четкие узкие всплески  $\gamma$ -излучения.

Так, из наблюдений подобных вспышек в 2000 г. Брехер [21] пришёл к выводу, что

скорость света не зависит от скорости источника света с точностью  $10^{-20}$ . Если считать, что расстояние до источников излучения было определено правильно, и при прохождении такого большого пути  $\gamma$ -кванты не испытывают переизлучения, этот эксперимент существенно повышает точность подтверждения второго постулата частной теории относительности.

## Литература

- [1] A. Einstein, Zur Electrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik, B. 17, S. 891 (1905).
- [2] P. Ehrenfest, Physikalische Zeitschrift, Bd. 13, S. 317 (1912).
- [3] C. V. Burton, Philosophical Magazine, v. 19, p. 417 (1910).
- [4] D. F. Comstock, Physical Review, v. 30, p. 267 (1910).
- [5] W. de Sitter, Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Physikalische Zeitschrift, B. 14, S. 429, 1297 (1913).
- [6] W. Zurhellen, Astronomische Nachrichten, B. 198, S. 1 (1914).
- [7] H. Thiring, Zeitschrift für Physik, B. 31, S. 133 (1925).
- [8] P. Moon, D. Spencer, Journal of the Optical Society of America, v. 43, p. 635 (1953).
- [9] Q. Majorana, Experimental demonstration of the constancy of velocity of light emitted by a moving source, Lincei Rendues, v. 27, p. 402 (1918).
- [10] А. М. Бонч-Бруевич, В. А. Молчанов, Новый оптический релятивистский опыт, Оптика и спектроскопия, т. 1, вып. 2, с. 113 (1956).
- [11] J. G. Fox, Experimental evidence for the second postulate of special relativity, American Journal of Physics, v. 30, No. 4, p. 297 (1962).
- [12] D. Luckey, J. W. Weil, Physical Review, v. 85, p. 1060 (1952).
- [13] W. Kantor, Direct first-order experiment on the propagation of light from a moving source, Journal of the Optical Society of America, v. 52, No. 9, p. 978 (1962).
- [14] J. F. James, R. S. Sternberg, Change in velocity of light emitted by a moving source, Nature, v. 197, No. 4873, p. 1192 (1963).
- [15] G. C. Babcock, T. G. Bergman, Determination of the constancy of the speed of light, Journal of the Optical Society of America, v. 54, No. 2, p. 147 (1964).

- [16] P. Beckmann, P. Mandics, Test of the constancy of the velocity of electromagnetic radiation in high vacuum, *Radio Science Journal of R. N. B. S.*, v. 69D, No. 4, p. 623 (1965).
- [17] T. Alväger, A. Nilsson, J. Kjellman, On the independence of the velocity of light of the motion of the light source, *Arkiv för Fysik*, B. 2, nr 16, S. 209 (1964).
- [18] D. Sadeh, Experimental evidence for the constancy of the velocity of gamma rays, using annihilation in flight, *Physical Review Letters*, v. 10, p. 271 (1963).
- [19] T. A. Fillipas, J. G. Fox, Velocity of gamma rays from a moving source, *Physical Review*, v. 135, p. 1075 (1964).
- [20] T. Alväger, F. Farley, J. Kjellman, J. Wallin, Test of the second postulate of special relativity in the GeV region, *Physical Review Letters*, v. 12, No. 3, p. 260 (1964).
- [21] K. Brecher, *The American Institute of Physics, Bulletin of Physics News*, No. 484, May 11, 2000.