

21. Новая экспериментальная проверка специальной теории относительности

**Дж. П. Седархольм, Ватсоновская лаборатория IBM,
проф. Ч.Х.Таунс, Колумбийский университет, Нью-Йорк**

**A new experimental test of special relativity
J.P.Cedarholm, I.B.M.Watson Laboratory,
prof. C.H.Townes, Columbia University, New York**

Эксперименты, с помощью которых проверялась специальная теория относительности, обычно предъявляли высокие требования к тщательности и точности для того, чтобы обнаружить и проверить малые отличия между предсказаниями специальной теории относительности и другими альтернативными теориями. Это объясняется тем, что эти отличия умножаются на очень малую величину $(v/c)^2$, где c – скорость света, а v – относительная скорость, которая много меньше c . Поэтому эксперименты, которые четко выражали поддержку специальной теории относительности перед другими теориями, такими, как простая теория эфира, требовали измерения необычайно малых величин, пропорциональных $(v/c)^2$ с поражающей воображение точностью. Первые эксперименты Майкельсона и Морли [1], например, были необыкновенно точны. Но вся их тщательность была направлена на определение изменения длины светового пути на 10^{-8} , происходящего

вследствие движения Земли вокруг Солнца, что следовало из теории эфирных течений, и при этом можно было установить верхний предел не менее $1/40$ этого значения, или $1/6$ орбитальной скорости Земли. Последующие очень тщательные эксперименты подобного типа [2], проведенные полстолетия спустя, установили верхний предел эфирного ветра в $1/20$ скорости Земли вокруг Солнца. Другие [3], даже предполагающие существование эфирного ветра, дали не более $1/5$ орбитальной скорости Земли. Появление атомных часов, обладающих очень высокой точностью, позволяет еще более повысить точность экспериментальных проверок, одна из которых более или менее полно описана ниже.

В эксперименте сравниваются частоты двух мазерных генераторов [4], излучения молекул аммиака которых направлены в противоположные стороны, но оба параллельно ожидаемому направлению движения через эфир. Если оба мазера повернуть на 180° и их частоты снова сравнить, то вследствие движения мазеров сквозь эфир произойдет изменение их относительных частот; при этом предполагается, что молекулярные вибраторы при таком движении будут неизменными. При сравнении частот может быть достигнута точность $1/10^{12}$, но недостаточно найти изменение частоты, чтобы утверждать, что верхний предел эфирного ветра найден с точностью до $1/1000$ орбитальной скорости Земли. Эта точность также зависит от ряда других эффектов, которые будут обсуждены ниже.

Эффект влияния на частоту излучения мазерного генератора движения сквозь эфир были впервые разработан Меллером [5]. Вкратце, некоторое интуитивное объяснение этого сдвига следующее. В этом приборе молекулы аммиака в возбужденном состоянии перемещаются с тепловой скоростью вдоль оси круглого цилиндрического канала, отдавая свою энергию. Если канал стационарен относительно эфира, стоячие волны могут рассматриваться как состоящие из движущихся волн с волновыми фронтами почти параллельными оси. Когда молекула движется вдоль оси, доплеровский эффект не возникнет. Если же аппарат движется соосно сквозь эфир со скоростью v , волновой фронт должен повернуться на угол $\alpha = v/c$, чтобы следовать этой осевой скорости. Следовательно, молекулы, движущиеся со скоростью u через канал, дадут частоту, сдвинутую из-за доплеровского эффекта на величину $u\alpha/c = uv/c^2$. Здесь ν — молекулярная частота. Поскольку u/c^2 зависит от относительного направления u и v , два мазера с противоположно направленными лучами должны дать частоты, разность между которыми составит $2uv/c^2$ благодаря этому эффекту.

Если каждый из них повернется на 180° , полное изменение их частотной разности составит $4uv/c^2$.

Специальная теория относительности предсказывает тот же самый результат, что и эфирная теория, предсказавшая, что фицджеральдовское сокращение $\sqrt{1-v^2/c^2}$ возникает в некотором отрезке, параллельном движению скорости V сквозь эфир, и что свойство времени в любых часах или генераторе изменяется с тем же самым фактором $\sqrt{1-v^2/c^2}$, благодаря этому движению. Иными словами, некоторый эффект, вызванный движением через эфир, почти компенсируется соответствующим изменением масштаба длины и времени, которые отвечают преобразованиям Лоренца. Если далее эфирная теория обходится без фицджеральдовского сокращения и замедления времени, то ожидаемое изменение частоты может быть найдено из соответствующих изменений длины и времени.

Рассмотрим сначала фицджеральдовское сокращение. Оно очень слабо влияет на частоту генерации мазеров и им можно пренебречь, потому что эта частота практически не чувствительна к изменению размеров и резонансной частоте канала [4].

Мы видим, однако, что замедление времени окажет влияние. Если канал движется сквозь эфир со скоростью v , а молекулы через канал — со скоростью u , то молекулярная скорость движения сквозь эфир составит $V = u+v$, и молекулярное время будет замедлено для наблюдателя в системе отсчета эфира на коэффициент

$$\sqrt{1 - \frac{(u+v)^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{u^2}{2c^2} - \frac{uv}{c^2} - \frac{v^2}{c^2}.$$

Но время в реальной лабораторной системе отсчета, которое фиксировано относительно канала, замедляется коэффициентом

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{v^2}{2c^2}.$$

Следовательно, молекулы должны иметь кажущееся замедление для наблюдателя в лаборатории, равное разности между этими двумя величинами или коэффициенту

$$1 - \frac{u^2}{2c^2} - \frac{uv}{c^2}.$$

Первая малая поправка — это хорошо известный доплеровский эффект, он не зависит от эфирного ветра. Вторая малая поправка — это

член uv/c^2 , если мы следуем представлениям о простом эфире, а не замедлению времени в генерации молекул, как это и постулировано Меллером в первоначальном обсуждении [5].

Из изложенного выше становится ясно, что недостаточность видеть некоторое изменение во временном эквиваленте малой составляющей части величины uv/c^2 может быть объяснена и без допущения замедления времени для тех, кто хочет придерживаться теории эфира с такими особенностями. Следовательно, эксперимент более близок к эксперименту Кеннеди-Торндайка [6], чем Майкельсона и Морли. Нулевой результат Майкельсона и Морли нуждается, конечно, только в привлечении понятия фицджеральдовского сокращения для его объяснения.

Для выполнения нашего эксперимента два аммиачных лучевых лазера с противоположным направлением лучей были смонтированы на раме, которая вращалась вокруг вертикальной оси. Частоты этих генераторов составляли примерно 23.870 МГц. Тепловая скорость $u = 0,6$ км/с для NH_3 при комнатной температуре. Если орбитальная скорость Земли предположительно и есть скорость движения сквозь эфир, то $v = 30$ км/с, а изменение частоты составит $4uv/c^2 = 20$ Гц, когда лазеры повернутся на 180° от первоначальной позиции восток-запад в полдень или в полночь.

В изменениях относительной частоты двух лазеров случайные флуктуации составили около 1/10 Гц. На протяжении продолжительного периода, требуемого для проведения измерений, до и после поворота средняя частота изменилась не более, чем на 1/50 Гц или на $1/10^{12}$. Следовательно, вариации в 20 Гц, ожидаемые из эфирной теории, должны быть легко обнаруживаемы. В самом деле, были отмечены вариации около 1 Гц при вращении двух лазеров. Однако эти вариации могут быть устранены с помощью магнитной защиты лазеров, но без экранировки оставалась константа около 1/50 Гц при повороте Земли на 1 об. в течение 24 ч. Это показывает, что сдвиг не более 1/50 Гц может быть приписан эфирному ветру.

Эксперимент с использованием вращения двух лазеров был тщательно выполнен в начале дня 20 сентября 1958 г. [7]. Не было зарегистрировано никакого эффекта, превышающего 1/50 Гц. Следовательно, поскольку орбитальной скорости Земли 30 км/с должно соответствовать изменению частоты в 20 Гц, эфирный ветер не мог быть большим, чем 1/1000 от этой величины или 30 м/с. Конечно, возможно, что движение Земли было скомпенсировано в это время года движением Солнечной системы сквозь эфир. Поэтому эксперимент был

повторен в Ватсоновской лаборатории в течение 24-часовых оборотов на протяжении почти трехмесячного интервала в течение года. Но ни на одном из этих оборотов не было получено эффекта, превышающего $1/50$ Гц.

Настоящий эксперимент установил верхний предел скорости эфирного ветра около $1/50$ той, которая следовала из предшествующих экспериментов. Такая часть определена тем, что измеренный эффект линейно относительно скорости эфирного ветра v . Эксперимент же типа эксперимента Майкельсона—Морли рассчитан на частичное изменение величины $v^2/2c^2$, которая по порядку больше, чем величина uv/c^2 , обсуждаемая здесь. Верхний предел в $1/400 v^2/2c^2$ установлен очень тщательно экспериментами Джуса [2] с интерферометром Майкельсона. Однако, поскольку это член второго порядка относительно v , верхний предел, установленный для скорости эфирного ветра, есть $1/20$ орбитальной скорости Земли или $1,5$ км/с. Настоящие же эксперименты имеют то преимущество, что ожидаемый эффект пропорционален v , а также то, что двое часов могут теперь сравниваться с много большей точностью, чем два расстояния. Этот эксперимент, включающий сравнение двух мазерных генераторов с точностью $1/10^{12}$, может быть, является наиболее точным экспериментом из всех, до сих пор описанных.

Для большинства физиков подтверждение постулатов специальной теории относительности об отсутствии абсолютного движения может и не являться сюрпризом, и более точная экспериментальная проверка может быть даже не важна, потому что этот постулат воспринимается интуитивно удовлетворительно и признается вполне правильным. Нужно, однако, заметить, что положительный эффект в данном эксперименте мог бы дать новую информацию без необходимости изменения основных принципов теории относительности. Скорость движения Земли включает в себя скорость относительно других частей Солнечной системы, так же как и относительно неподвижных звезд и внешних галактик. Следовательно, это относительное движение может, в принципе, создать некоторую анизотропию в пространстве и некоторый сдвиг относительно частоты двух мазеров, когда они поворачиваются на 180° .

Дике предположил [8], что эффект, производимый движением по отношению к неподвижным массам Вселенной, должен существовать реально, но он может иметь порядок тонкой структурной константы α , уменьшая влияние эфирного ветра. Это соответствует частотному сдвигу в настоящем эксперименте порядка $1/7$ Гц. Причины, излага-

мы Дике, по которым такой сдвиг может существовать, спекулятивны, но очень интересны. Настоящие результаты не дали сдвига более $1/50$ Гц, который несколько отличается по порядку от величины $4\pi v/c^2$.

Оптические мазерные генераторы должны также сами по себе представлять интерес для экспериментов по специальной теории относительности, поскольку с их помощью, вероятно, можно будет проверять такие изменения в длине, как $1/10^{12}$. Оптический мазерный генератор может быть сконструирован с резонансом между двумя эталонными пластинами, которые ближе по частоте, чем атомный резонанс энергий. В этом случае частота должна зависеть от расположения пластин и будет стабильнее, чем в атомных частотах. Установлено, что генератор будет монохроматическим в пределах $1/10^{11}$. Это предполагает эксперимент, в котором генерации от двух оптических мазеров образуют биение в фотоэлементе. Один из мазеров может поворачиваться вокруг вертикальной оси. Если исходить из теории эфира, частота биения должна изменяться на величину $\pm v^2/2c^2$ по тем же самым причинам, что и в эксперименте Майкельсона-Морли, что предполагалось увидеть как изменение в длине оптического пути. Составляющая v^2/c^2 есть 10^{-8} , так что это может быть обнаружено в настоящее время с отличной точностью.

Список литературы

1. Michelson A.A., Morley E.W. // Amer.J.Sci. 1887. Vol.34. P.333.
2. Joos G. // Ann. Phys. 1930. Vol. 7. P.385.
3. Miller D.C. // Revs. Mod. Phys. 1933. Vol.5. P.203.
- See, however, Shankland R.S., McCuskey S.W., Leone F.C., Kuerti G. // Ibid. 1955. Vol.27. P.167.
4. Gordon J.P., Zeiger H.J., Townes C.H. // Phys. Rev. 1955. Vol.99. P.1264.
5. Moller C. // Nuovo Cimento. 1957. Vol.6. Supp. P.381.
6. Kennedy R.J., Thorndike E.M. // Phys. Rev. 1932. Vol.42. P.400.
7. Cedarholm J.P., Bland G.P., Havens B.L., Townes C.H. // Phys. Rev. Lett. 1958. Vol.1. P.342.
8. Dicke R.H. // Proc. Symp. Quantum Electronics. Columbia Univ. Press. 1960.
9. Schawlow A.L., Townes C.H. // Phys. Rev. 1958. Vol.112. P.1940.

Nature. October 31. 1959. Vol.184, №4696. P.1350-1351.