

Все наблюдения обнаружили наличие смещений изображений звезд в сторону, требуемую теорией относительности, а величина отклонения имеет тот же порядок, к какому приводят теоретические расчеты [83].

А. А. Михайлов в своем критическом обзоре наблюдений эффекта Эйнштейна писал: «Выведенные из измерений фотографий смещения звезд получаются сперва в виде разностей прямоугольных координат. После исправления за дифференциальную рефракцию и аберрацию, в случае надобности вычисляется радиальный компонент смещения

$$\Delta r = \Delta x \sin P + \Delta y \cos P,$$

где P — угол положения звезды относительно центра Солнца. Каждая звезда дает тогда уравнение

$$\Delta r = \frac{A}{r} + Br [84].$$

Здесь r — расстояние звезды от центра Солнца; A/r — эйнштейновское смещение, теоретическое значение которого $A = 1'',75$, если r выражено в единицах видимого радиуса Солнца; B — поправка масштаба.

Значение постоянной отклонения света с поправкой на масштаб дало из наблюдений затмений 1919 г. $A = 2'',07$; 1929 г. — $A = 1'',96$; 1936 г. — $A = 2'',07$; 1947 г. — $A = 2'',20$.

С удалением от Солнца смещение убывает, но пока закон этого убывания вывести не удалось.

В 1962 г. Суботович [85] предложил использовать искусственные спутники небесных тел для экспериментального наблюдения отклонения луча света при распространении в гравитационном поле. Спутники должны двигаться по строго определенным орбитам и снабжены источниками электромагнитного излучения.

Отклонение света должно измеряться не фотометрическим методом. Предлагается измерять время затмения спутника небесным телом (τ). Отклонение приведет к тому, что измеренное время затмения будет меньше рассчитанного, при условии прямолинейного распространения, на величину $\Delta\tau$.

В работе приведена таблица значений $\Delta\tau/\tau$ для искусственных спутников Луны, Марса, Солнца, Земли.

8. ГРАВИТАЦИОННОЕ СМЕЩЕНИЕ

В 1907 г. в работе «О принципе относительности и его следствиях» Эйнштейн показал, что если в точке с гравитационным потенциалом Φ находятся часы, показывающие «местное время», то в соответствии с соотношением

$$\sigma = \tau \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right) \quad (1)$$

их показания в $(1 + \frac{\Phi}{c^2})$ раз больше, чем показания одинаковых с ними часов, находящихся в начале координат. Местное время — это время, которое показывают часы, установленные в равномерно ускоренной системе на расстоянии x от начала координат.

«В этом смысле,— пишет Эйнштейн,— можно сказать, что процесс, происходящий в часах,— и вообще любой физический процесс — протекает тем быстрее, чем больше гравитационный потенциал в области, где разыгрывается этот процесс» [26, стр. 110]. Из предположения о выполнимости формулы (1) в неоднородном гравитационном поле следует, что свет, исходящий от источника света с линейчатым спектром, расположенного на поверхности Солнца, «обладает длиной волны, приблизительно на две миллионных доли больше, чем свет, испускаемый теми же атомами на Земле» [26, стр. 110]. В 1911 г. в работе «О влиянии силы тяжести на распространение света» Эйнштейн возвратился к доказательству соотношения (1). Он писал: «Если излучение, испускаемое в равномерно ускоренной системе отсчета K' из S_2 по направлению к S_1 , имело относительно находящихся в S_2 часов частоту ν_2 , то при прибытии в S_1 оно имеет относительно находящихся там точно таких же часов уже частоту не ν_2 , а большую частоту ν_1 , которая в первом приближении равна

$$\nu_1 = \nu_2 \left(1 + \frac{\gamma h}{c^2} \right). \quad (2)$$

В самом деле, если снова ввести неускоренную систему отсчета K_0 , относительно которой система отсчета K' в момент испускания света имела нулевую скорость, то S_1 будет иметь относительно K_0 в момент прибытия излучения в S_1 скорость $\gamma \frac{h}{c}$, откуда в силу принципа Доплера непосредственно получается соотношение (2)» [26, стр. 170].

Эйнштейн отмечает, что смещение спектральных линий солнечного света по сравнению с соответствующими спектральными линиями земных источников в сторону красного конца спектра можно было бы измерить, если бы были известны условия, при которых испускается солнечный свет, при этом он ссылается на работы Джевела (1897) и Фабри и Буассона (1909).

В 1916 г. в работе «Основы общей теории относительности» анализируются свойства масштабов и часов в статическом гравитационном поле: «Пусть, далее, исследуется скорость хода эталонных часов, которые установлены неподвижно в статическом гравитационном поле. Для единичного интервала времени в этом случае имеем:

$$\begin{aligned}
 ds &= 1, \quad dx_1 = dx_2 = dx_3 = 0, \\
 1 &= g_{44} dx_4^2, \\
 dx_4 &= \frac{1}{\sqrt{g_{44}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (g_{44} - 1)}} = 1 - \frac{g_{44} - 1}{2},
 \end{aligned}$$

или

$$dx_4 = 1 + \frac{\kappa}{8\pi} \int \frac{\rho \, d\tau}{r}.$$

Итак, часы идут медленнее, если они установлены вблизи весомых масс. Отсюда следует, что спектральные линии света, падающего к нам с поверхности больших звезд, должны сместиться к красному концу спектра» [26, стр. 502].

В примечании Эйнштейн отмечает, что, согласно Э. Фрейндлиху, спектральные наблюдения над звездами определенных типов говорят в пользу существования подобного эффекта, но окончательная проверка не была еще предпринята.

В 1920 г. в приложении к книге «О специальной и общей теории относительности» Эйнштейн приводит формулу для смещения

$$\frac{v_0 - v}{v_0} = \frac{KM}{c^2 r}$$

и отмечает, что надежный расчет для неподвижных звезд невозможен, поскольку ни масса M , ни радиус r неизвестны. «Вопрос о том, существует ли этот эффект, остается открытым; в настоящее время астрономы с большим упорством работают над его решением. Вследствие того, что этот эффект в случае Солнца весьма мал, трудно судить о его существовании» [26, стр. 598]. Эйнштейн указывает на исследования Греббе и Бахем, которые на основе собственных измерений и измерений Эвершеде и Шварцшильда для полос циана считают эффект гравитационного смещения существующим, а также на исследования Сент-Джона и других, отрицающих существование эффекта. Далее Эйнштейн указывает, что средние смещения спектральных линий в сторону длинноволновой части спектра обнаружены при статистических исследованиях неподвижных звезд, но состояние обработки материалов не позволяет прийти к однозначному ответу.

Спектр спутника Сириуса, как удобный объект для наблюдения, исследовал В. Адамс, обнаруживший гравитационное смещение, эквивалентное доплеровскому смещению при удалении источника со скоростью 20 км/сек .

В дальнейшем со скоростью предприняты многочисленные проверки гравитационного смещения с помощью астрономических наблюдений, приведшие в основном лишь к качественным подтверж-

дениям. В. Л. Гинзбург рассмотрел вопрос об использовании искусственных спутников Земли для проверки гравитационного смещения [86].

После открытия в 1958 г. эффекта Мессбауера возникли новые методы проверки гравитационного смещения. Испускаемые при переходах ядра из возбужденного состояния в основное γ -кванты обычно не в состоянии перевести то же самое ядро из основного состояния в возбужденное путем резонансного поглощения. Это объясняется тем, что γ -квант передает импульс отдаче испускающему или поглощающему атому. Л. Мессбауер доказал существование процессов испускания и поглощения без отдачи. Ему удалось при известных условиях добиться того, что импульс отдачи передается всему кристаллу, масса которого велика по сравнению с массой всего ядра. Эффект Мессбауера был использован для экспериментальной проверки гравитационного смещения.

Особенно удобными для работы представлялись изотопы Fe^{57} с энергией γ -перехода 14,4 кэв и Zn^{67} с энергией 93 кэв. Разность высот, дающая сдвиг в одну ширину линии, равнялась соответственно 2,9 км и 4,74 м. Но в дальнейшем оказалось, что по ряду причин предпочтение должно быть отдано Fe^{57} . У него достаточно большая доля γ -квантов излучается без отдачи даже при комнатной температуре и большее время жизни исходного изотопа Co^{57} , что обеспечивало возможность длительных опытов при обычных температурах.

Проведение экспериментов было начато одновременно в Гарварде Паундом и Ребка и в Гарвелле Крэншоу, Шиффером и Уайтхедом. Гарвельская группа опубликовала результаты несколько раньше. В их опытах излучатель располагался на 12,5 м выше поглотителя. Теоретически ожидаемое относительное гравитационное смещение равнялось

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2} = \frac{981 \cdot 1250}{9 \cdot 10^{20}} = 1,36 \cdot 10^{-15}.$$

Смещение определялось по эквивалентному линейному доплер-эффекту, вызванному периодическим движением источника вверх и вниз.

Наблюдаемое смещение составляло $0,96 \pm 0,54$ от вычисленного. По данным авторов, их опыт свидетельствует о том, что вероятность отсутствия искомого эффекта составляет лишь 0,017.

Паунд и Ребка опубликовали свои результаты лишь после тщательного изучения различных факторов, могущих влиять на точность измерений [87, стр. 94—99, 305]. Было обнаружено, что при любых комбинациях источника и поглотителя имеет место определенная асимметрия линий, которая менялась при переходе от одной комбинации к другой. Это означало, что наблюдаемые разности частот нельзя было полностью приписывать исследуе-

тому эффекту. Поэтому необходимо было измерять не абсолютные сдвиги частот, а относительные изменения, происходящие при переходе от одной комбинации к другой. Это позволяло выделить эффект гравитационного смещения. Сильное влияние на точность результатов оказывала разность температур источника и поглотителя [88]. Разница в 1°C уже давала смещение того же порядка, что и искомое. Поэтому были приняты меры непрерывного измерения температуры, что позволяло вносить соответствующие поправки при обработке результатов.

Опыты проводились в башне высотой 22 м. В первой серии опытов излучатель помещался сверху, поглотитель — внизу, а в другой, наоборот. Это удавалось измерить смещение. Для устранения поглощения γ -лучей с энергией 14,4 кэв атмосферным воздухом по всей длине башни располагался цилиндрический баллон, наполненный гелием. Гравитационное смещение компенсировалось приведением в синусоидальное движение источника с помощью магнитоэлектрического или сегнетоэлектрического преобразователя.

При условиях опыта теоретически вычисленное относительное смещение составляет $4,92 \cdot 10^{-15}$; эксперимент дал $(5,18 \pm \pm 0,51) 10^{-15}$; отношение $\Delta\nu_{\text{эксп}}/\Delta\nu_{\text{теор}} = 1,02 \pm 0,12$. По уточненным данным Паунда [89], среднее для всех измерений дает $0,98 \pm 0,04$; это означает, что предсказанное гравитационное смещение существует и подтверждается экспериментом по крайней мере в пределах 4%.

Отметим еще, что измерение смещений, меньших естественной ширины линии, в опытах описанного типа было возможно благодаря модуляции скорости, при которой энергия γ -квантов источника периодически менялась так, чтобы соответствовать более наклонным участкам резонансной кривой.

Новые данные опубликовали в 1964 г. Крэншоу и Шиффер [90]. Оставив в принципе схему установки неизменной, они тщательно проанализировали источники возможных ошибок, ввели ряд технических усовершенствований и получили смещение, составляющее $0,850 \pm 0,08$ от теоретического.

Значение опытов по измерению гравитационного смещения для подтверждения общей теории относительности было рассмотрено в статье В. Л. Гинзбурга [91].

Эффект Мессбауера в Fe^{57} был использован также для обнаружения и измерения красного смещения при движении фотонов в ускоренной системе. На основе принципа эквивалентности в этом случае можно получить величину искомого смещения, заменяя ускорение эффективным гравитационным полем и вычисляя разность потенциалов этого поля для источника и поглотителя. В опытах Хейя и др. [92] установка состояла из двух концентрических цилиндров с радиусами 6,64 и 0,4 см, закрепленных неподвижно между двумя параллельными пластинками.

На поверхность второго цилиндра наносился излучатель, первого — поглотитель. Вся система могла вращаться со скоростью до 500 об/сек. Проходящее через поглотитель γ -излучение регистрировалось пропорциональным счетчиком. Так как потенциал на расстоянии R от центра будет $\Phi = -\frac{1}{2}R^2\omega^2$, то относительное смещение частоты будет

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta\Phi}{c^2} = \frac{(R_1^2 - R_2^2)\omega^2}{2c^2}. \quad (1)$$

Здесь R_1 и R_2 — радиусы цилиндров; ω — угловая скорость. В условиях описываемого опыта при 400 об/сек ожидаемое смещение составляло

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{6,64^2 - 0,4^2}{2,9 \cdot 10^{20}} 4\pi^2 \cdot 400^2 = 1,51 \cdot 10^{-13}.$$

По данным авторов эксперимента, полученные результаты в пределах ошибок измерения хорошо согласуются с теоретически ожидаемыми. Авторы выразили надежду, что улучшение техники эксперимента при более детальном учете всех влияющих факторов может привести к дальнейшему повышению точности измерений. По более поздним данным Хейя [93], отношение экспериментального и теоретического смещения равно $1,00 \pm 0,06$ с надежностью 95%.

Если описанный опыт рассматривается в системе отсчета, связанной с ускоренно движущимся поглотителем, то имеем дело с «псевдогравитационным» смещением, т. е. принципом эквивалентности общей теории относительности. Но этот же опыт можно рассматривать в инерциальной системе источника.

При движении поглотителя по отношению к излучателю имеет место эффект Доплера. Релятивистская формула для доплеровского смещения дает

$$\nu' = \nu \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Если ограничиться только членами второго порядка, то получим

$$\nu' = \nu \left(1 - \frac{v}{c} \cos \varphi \right) \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (2)$$

В случае вращения ротора угол между скоростью поглотителя и направлением распространения кванта $\varphi = 0$. Поэтому сохраняется лишь квадратичный эффект

$$\nu' = \nu \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (3)$$

Отсюда, учитывая, что $v = \omega R$, сразу получаем формулу (1).