

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ
ДЛЯ ПРОВЕРКИ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В. Л. Гинзбург

Общая теория относительности принадлежит к числу наиболее фундаментальных физических построений. Помимо общефизического и методического значения, эта теория служит единственной надежной основой для теоретического анализа космологических вопросов. Поэтому важность экспериментальной проверки общей теории относительности представляется очевидной. Однако следующие из теории эффекты, допускающие количественную проверку, весьма малы и, несмотря на то, что работа в этом направлении ведется почти сорок лет, некоторые моменты здесь нуждаются в дальнейшем исследовании и уточнении.

Современное состояние вопроса об экспериментальной проверке общей теории относительности освещено в статье¹. Здесь мы ограничимся лишь кратким резюме.

Из теории следует, что перигелий планет должен медленно поворачиваться. Для Меркурия этот эффект является наибольшим и составляет 43,03 угловых секунды в столетие. Данные наблюдений полностью подтверждают этот вывод, так как приводят к значению $\Psi = 42''$, $56 \pm 0,94$. Для Земли, согласно теории $\Psi = 3'',8$, а по данным наблюдений $\Psi = 4'',6 \pm 2'',7$. Для других планет сколько-нибудь надежных наблюдений нет, и эффект поворота перигелия может считаться хорошо подтвержденным только для одного случая (Меркурия).

Вторым эффектом, вытекающим из общей теории относительности, является отклонение световых лучей, проходящих вблизи Солнца. Для луча, идущего у самого края солнечного диска, угол отклонения α согласно теории равен $1'',75$. Соответствующие наблюдения, проводившиеся во время целого ряда солнечных затмений, начиная с 1919 г., подтвердили факт существования этого эффекта. При этом среднее значение α равно $1'',98 \pm 0'',12$. Таким образом, наблюдения подтверждают в этом пункте теорию с точностью примерно до 10%. Несомненно, желательно достижение большей точности, а главное проверка вытекающей из теории зависимости угла отклонения лучей от их расстояния до центра Солнца *).

Третьим эффектом является гравитационное смещение спектральных линий. Именно, если источник излучения находится в точке с гравитационным потенциалом ϕ_1 и его собственная частота есть ν_1 (это есть частота, измеряемая вблизи источника), то на Земле будет наблюдаться

*) Согласно теории $\alpha = \frac{Cr_{\odot}}{R}$, где r_{\odot} — радиус Солнца и R — расстояние луча до солнечного центра. Приведенные в тексте значения α отвечают случаю, когда $R = r_{\odot}$, т. е. равны постоянной C . Характер зависимости α от R в результате наблюдений еще не установлен.

излучение с частотой ν_2 , причем

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2}, \quad (1)$$

где φ_2 — потенциал, отвечающий в данном случае земной поверхности, c — скорость света в вакууме и $\nu \approx \nu_1 \approx \nu_2$, поскольку смещение частоты $\Delta\nu$ обычно очень мало.

При наблюдении на Земле излучения какой-либо звезды или Солнца можно практически положить $\varphi_2 = 0$ и $\varphi_1 = -\frac{\chi M}{c^2 r_0}$, где $\chi = 6,670 \times 10^{-8} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-2}$, M — масса звезды и r_0 — радиус ее фотосферы. В случае Солнца отсюда получаем значение

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\chi M_{\odot}}{c^2 r_{\odot}} = -2,12 \cdot 10^{-6}. \quad (2)$$

Для некоторых белых карликов значение $\frac{\Delta\nu}{\nu}$ в 10—30 раз больше, чем для Солнца. Однако в этом случае в силу отсутствия достаточно точных сведений о величине массы M и радиуса r_0 звезды трудно количественно проверить теорию. Для Солнца количественная проверка теории также затруднена в связи с существованием, помимо релятивистского эффекта, некоторых других источников смещения частоты спектральных линий (см.^{1,2}). В результате, хотя эффект гравитационного смещения спектральных линий и может считаться установленным как для белых карликов, так и для Солнца, количественная проверка формулы (1) не проведена.

Итак, эффекты общей теории относительности обнаружены, и теория в целом успешно выдержала сравнение с данными наблюдений. Тем не менее, фундаментальный характер теории не позволяет удовлетвориться достигнутыми результатами, и ее дальнейшая проверка, безусловно, целесообразна.

Использовавшиеся до сих пор астрономические методы еще не исчерпаны. Наряду с этим, однако, желательно нахождение новых путей, которые позволили бы проверить теорию быстрее и с большей точностью. Некоторые возможности в этом отношении открываются при использовании искусственных спутников Земли.

Перигей искусственного спутника Земли будет вращаться подобно перигелиям планет, движущихся вокруг Солнца. При этом, как оказывается (см.³, а также ¹), это вращение значительно больше даже, чем для Меркурия, и для близких спутников достигает примерно 1500" в столетие. Эффект тем больше, чем ближе спутник находится к Земле; на расстоянии в 3 радиуса от центра Земли он примерно в десять раз меньше указанного, а для Луны вращение перигея уже ничтожно (оно составляет 0",06 в столетие *). Возможная точность определения траектории спутника значительно выше, чем точность определения элементов орбиты Меркурия, и заметить релятивистский эффект на спутниках можно было бы, по-видимому, без особого труда. Но, с другой стороны, в этом случае для сравнения теории с наблюдениями имеются и большие трудности. Дело в том, что траектория спутника не будет строго эллиптической даже при полном пренебрежении релятивистскими эффектами, поскольку на движение спутника оказывают влияние сопротивление воздуха в ионосфере, несферическое распределение масс на Земле и воз-

*) Речь идет о смещении перигея, обусловленном влиянием Земли. Под влиянием поля Солнца перигей земных спутников поворачиваются на угол 1",9 в столетие (в ¹, в силу ошибки, встречающейся в литературе, указано неверное значение 7",6).

мущающее действие других небесных тел (в особенности Луны). Если последний фактор учесть легко, то этого нельзя сказать о первом и в особенности о втором. Поэтому пока еще остается не ясным, в какой мере и как скоро удастся предвычислять траекторию спутника с точностью, достаточной для выявления релятивистского эффекта. Поскольку, однако, у нас нет никаких оснований сомневаться в подобной возможности, укажем еще на один эффект общей теории относительности, который, в принципе, можно было бы обнаружить, изучая траекторию спутника.

Речь идет о дополнительном смещении перигея спутника, а также движения узлов его орбиты, обусловленном вращением Земли (см. ⁴ и подробнее в ¹). Этот довольно интересный четвертый эффект общей теории относительности для спутников Земли достигает $50''$ в столетие, т. е. такого же порядка, как весь релятивистский эффект для Меркурия (релятивистское смещение перигелия Меркурия, обусловленное вращением Солнца, составляет всего $0'',01$ в столетие, что лежит далеко за пределами точности измерений). Релятивистский «эффект вращения», о котором идет речь, может, таким образом, составлять до $1/30$ от общего релятивистского эффекта смещения перигея спутников. Поэтому, если точность определения этого смещения будет достаточно большей, то можно будет выделить и «эффект вращения».

Искусственный спутник может использоваться и для измерения гравитационного смещения частоты. Из формулы (1) ясно, что при приеме на Земле излучения от достаточно далекого источника, для которого $|\varphi_1| \ll |\varphi_2|$, мы имеем:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\varphi_2}{c^2} = \frac{GM}{c^2 r} = 7 \cdot 10^{-10}, \quad (3)$$

где $r = 6,37 \cdot 10^8$ см — радиус Земли и $M = 5,98 \cdot 10^{27}$ г — ее масса.

Смещение частоты (3) является «фиолетовым», а при наблюдении солнечного излучения на Земле гравитационное смещение является «красным», т. е. $\Delta\nu < 0$ (см. (2)). В оптике об измерении относительного смещения частоты порядка 10^{-9} сейчас не может быть и речи, но в радиодиапазоне это вполне реально (стабильность атомных часов и молекулярного генератора, отвечающая значениям $\frac{\Delta\nu}{\nu} \sim 10^{-9} \div 10^{-10}$, уже достигнута).

В этой связи и представляется возможным использовать искусственные спутники для измерения гравитационного смещения частоты в радиодиапазоне ^{1, 2, 4, 5}. К сожалению, для близких спутников, которые, по-видимому, будут запускаться в первое время, это смещение значительно меньше предельного значения (3). Так, для спутника, находящегося на высоте h над Землей, причем $h \ll r = 6,37 \cdot 10^8$ см,

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gh(1 - h/r)}{c^2} = 1,09 \cdot 10^{-18} \left(1 - \frac{h}{r}\right) h \quad (4)$$

и при $h = 8 \cdot 10^7 = 800$ км, $\frac{\Delta\nu}{\nu} = 7,6 \cdot 10^{-11}$. Далее, помимо гравитационного смещения частоты, имеет место ее смещение в силу Допплер-эффекта первого и второго порядка. В результате полное смещение частоты равно

$$\left(\frac{\Delta\nu}{\nu}\right)_t = 1 + \frac{v_1}{c} \cos \theta - \frac{v_1^2}{2c^2} (1 - 2 \cos^2 \theta) + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2}, \quad (5)$$

где v_1 — скорость спутника и θ — угол между его скоростью и лучом зрения. На круговой орбите $v_1^2 = -\varphi$, так как φ_1 есть потенциал земного

поля на орбите спутника. Отсюда ясно, что для близких спутников, когда $|\varphi_1 - \varphi_2| \ll |\varphi_2|$, даже квадратичный Допплер-эффект больше гравитационного смещения частоты, не говоря уже о линейном эффекте Допплера, т. е. эффекте первого порядка по v/c . Правда, линейный эффект исчезает при $\theta = \pi/2$, но для близкого спутника угол θ близок к $\pi/2$ лишь в течение очень короткого промежутка времени и «обезвредить» линейный эффект не легко. С другой стороны, это можно сделать, если измерять не частоту, а разность между показаниями земных часов и часов на спутнике (см.¹, конец § 2 и⁵). Отношение этой разности $\Delta\tau$ к самому интервалу времени τ в случае круговой орбиты равно

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\tau}{\tau} &= \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2} - \frac{v_1^2}{2c^2} = \frac{\frac{3}{2} \varphi_1 - \varphi_2}{c^2} = \\ &= \frac{\chi M_{\odot}}{c^2 r_{\odot}} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{r_{\odot}}{r_{\odot} + h} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Разумеется, отношение (6) не превосходит значения (3), но в силу того, что линейный эффект Допплера исключен *), измерение $\Delta\tau$ может оказаться удобнее и легче, чем измерение $\Delta\nu$. В обоих случаях для получения максимального гравитационного эффекта изменения частоты или разности времен нужно использовать далекие спутники. При этом роль эффекта Допплера, очевидно, уменьшается, а выделение гравитационного смещения частоты облегчается. Следовательно, по крайней мере для далеких спутников, когда $h \gg r_{\odot}$ измерение релятивистского (гравитационного) смещения частоты представляется реальным. Быть может, оно удастся и для близких спутников.

Итак, использование искусственных спутников Земли открывает определенные, весьма заманчивые перспективы для дальнейшей проверки общей теории относительности **).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург, УФН 59, 11 (1956); *Fortschr. d. Physik* 5, 16 (1957); Сборник «Эйнштейн и современная физика», стр. 93, Гостехиздат (1956).
2. В. Л. Гинзбург, ДАН 97, 617 (1954).
3. L. La Paz, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 66, 13 (1954).
4. В. Л. Гинзбург, ЖЭТФ 30, 213 (1956).
5. S. F. Singer, *Phys. Rev.* 104, 11 (1956). См. также В. Hoffman, *Phys. Rev.* 106, 358 (1957).
6. W. A. Baum, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 68, 118 (1956).

*) Как указано в⁵, если ошибки в измерении времени носят чисто случайный характер, то точность определения $\frac{\Delta\tau}{\tau}$ повышается с ростом τ , чем можно будет в этом случае воспользоваться.

**) Помимо перечисленных возможностей можно также указать на определение при использовании искусственных спутников, яркости Метагалактики⁶. С поверхности Земли измерить эту яркость трудно из-за свечения ночного неба, которое мешает наблюдениям. Определение яркости Метагалактики имеет большое космологическое значение и связано с общей теорией относительности, на которой базируются теоретические исследования в области космологии.