

**2.2.2. Отклонение света в поле Солнца.** Сам факт отклонения луча света в гравитационном поле также не является свойством лишь только общей теории относительности. Как и любое материальное тело, обладающее энергией (и, значит, массой), луч света должен отклоняться в гравитационном поле. Иными словами, отклонение света существует уже в рамках теории всемирного тяготения. Этот эффект, по-видимому, был известен и Ньютону, однако впервые четко был сформулирован И. Г. Зольднером (1776–1833) в самом начале XIX века. Простейший расчет показывает, что в этом случае угол отклонения составляет

$$\Delta\theta = \frac{2GM}{c^2 R_{\min}}, \quad (147)$$

где  $R_{\min}$  есть минимальное сближение луча света с гравитирующим телом. Для Солнца при  $R_{\min} = R_{\odot}$  угол отклонения равен 0,8 угловых секунды.

Однако, как мы видели, при скоростях, близких к скорости света  $c$ , необходимо учитывать отличие от единицы не только в метрическом коэффициенте  $g_{00}$ , но и в метрическом коэффициенте  $g_{rr}$ . Как было показано, в слабых гравитационных полях поправки к плоской метрике Минковского в величинах  $g_{00}$  и  $g_{rr}$  в рамках ОТО совпадают. При этом обе поправки имеют одинаковый знак. Поэтому для луча света, у которого скорость в точности равна  $c$ , имеем

$$\Delta\theta = (1 + \gamma) \frac{2GM}{c^2 R_{\min}}, \quad (148)$$

т.е. для ОТО точно в два раза больше, чем это дает нерелятивистская теория.

Поэтому А. С. Эддингтон (1882–1944), проводивший в 1919 г. измерения во время солнечного затмения, имел четкую программу действий. Ему предстояло выяснить, какое из трех утверждений:

- 1) свет не отклоняется в поле Солнца,
  - 2) свет отклоняется на угол  $2GM/c^2 R$  согласно теории всемирного тяготения, что составляет 0,874 угловых секунд для края Солнца,
  - 3) свет отклоняется на угол  $4GM/c^2 R$  согласно общей теории относительности, т.е. на 1,749 угловых секунд,
- является истинным. Как показали измерения, проведенные в двух местах, величина отклонения составила  $1,98 \pm 0,30$  и  $1,61 \pm 0,30$  угловых секунд. Иными словами, с точностью порядка 15% результат совпадал с предсказанием ОТО. Собственно

говоря, именно после экспедиции Эддингтона, ответившей «да» на третий вопрос, теория относительности Эйнштейна и начала свое триумфальное шествие по миру. Впоследствии согласие с теорией было существенно улучшено, и сейчас мы имеем

$$\frac{1}{2}(1 + \gamma) = 1,001 \pm 0,003. \quad (149)$$

**2.2.3. Движение перигелия Меркурия.** Как уже говорилось, движение перигелия Меркурия (порядка 43 угловых секунды за столетие) было единственным строго установленным отличием от предсказаний нерелятивистской теории, которое было известно к началу XX века. Физически этот эффект связан с тем, что замкнутая эллиптическая орбита имеет место лишь для ньютоновского потенциала  $\varphi_g = -GM/r$  (а также для потенциала пружины  $\varphi_g \propto r^2$ , который не может быть реализован в астрофизике). Любое небольшое отличие от этого потенциала приводит к тому, что эллипс, по которому движется планета или звезда, сам начинает медленно вращаться, поскольку тело не возвращается точно в ту же точку, из которой оно начинало свое движение.

Точное выражение для углового смещения орбиты тела, масса которого много меньше массы центральной звезды  $M$ , за один оборот имеет вид

$$\Delta\varphi = 2\pi(2 + 2\gamma - \beta) \frac{GM}{c^2 a(1 - e^2)}, \quad (150)$$

где  $a$  — большая полуось орбиты, а  $e$  — ее эксцентриситет. Результаты астрономических наблюдений векового смещения перигелия для некоторых планет солнечной системы приведены в табл. 2. Радиолокационные же измерения смещения перигелия Меркурия дают еще большую точность

$$\frac{1}{3}(2 + 2\gamma - \beta) = 1,003 \pm 0,005. \quad (151)$$

Таблица 2. Вековое смещение перигелия для планет солнечной системы

Планета	$\Delta\theta^{(th)}$	$\Delta\theta^{(obs)}$	$(2 + 2\gamma - \beta)/3$
Меркурий	43,03	$43,11 \pm 0,45$	$1,003 \pm 0,005$
Венера	8,63	$8,4 \pm 4,8$	$0,97 \pm 0,55$
Земля	3,84	$5,0 \pm 1,2$	$1,3 \pm 0,3$
Марс	1,0	$1,3 \pm 0,4$	$1,3 \pm 0,4$
Икар	10,3	$9,8 \pm 0,8$	$0,95 \pm 0,08$

Как мы видим, здесь также существует полное согласие предсказаний общей теории относительности и наблюдений.

Сейчас вековое смещение перигелия известно и у ряда других планет солнечной системы. При этом, как видно из табл. 2, во всех случаях результаты наблюдений не противоречат предсказаниям общей теории относительности. С другой стороны, остальные планеты не могут соперничать с Меркурием по точности совпадения теории и наблюдений.

## 2.3. Новые эксперименты

**2.3.1. Задержка Шапиро.** Бурное развитие наблюдательной астрофизики в начале шестидесятых годов привело не только к возможности более точно проверить классические постньютоновские эффекты, но и сформулировать и проверить новые. Прежде всего, был сформулирован четвертый постньютоновский эффект, который носит имя руководителя проекта радиолокационного зондирования планет И. Шапиро. Если внутренняя планета, Меркурий или Венера, находится на наименьшем угловом расстоянии и при этом на противоположной части орбиты, то радиосигнал будет распространяться в непосредственной близости от Солнца, гравитационное поле которого сокращает промежутки времени и удлиняет расстояния. Поэтому сигналу, фактически, нужно пройти большее расстояние, чем то, которое было бы в плоском пространстве, не искаженном гравитационным полем Солнца.

В результате, на элементе луча длины  $\delta l$ , находящемся на расстоянии  $r$  от Солнца, временная задержка должна составить

$$c\delta t_S = (1 + \gamma) \frac{2GM}{c^2 r} \delta l. \quad (152)$$

Просуммировав теперь задержку от всей длины луча, получаем

$$\Delta t_S = (1 + \gamma) \frac{2GM}{c^3} \ln \frac{r_E + r_P + R}{r_E + r_P - R}, \quad (153)$$

где  $r_E$  и  $r_P$  — расстояния от Солнца до Земли и планеты, а  $R$  — расстояние между Землей и планетой. Формально этот эффект пропорционален  $c^{-3}$ , однако соотношение (152) показывает, что это такой же эффект  $\sim c^{-2}$ , как и классические постньютоновские эффекты, а появление дополнительной степени  $c$  связан с тем, что нас интересует время задержки, а не безразмерный угол.



Рис. 20. Задержка Шапиро при радиолокации планет. Сигнал возвратится на Землю чуть позже, чем если бы гравитационное поле Солнца не искажало пространство-время в своей окрестности

Проведенные наблюдения показали, что для Меркурия от элонгации до верхнего соединения время задержки  $\Delta t$  изменяется от 15 до 240 мкс. При этом согласие с предсказаниями ОТО составляет

$$\frac{1}{2} (1 + \gamma) = 1,01 \pm 0,02. \quad (154)$$

Характерный ход временной задержки показан на рис. 20. Впоследствии для определения задержки Шапиро были использованы космические аппараты, запущенные для изучения внешних планет солнечной системы. В результате, согласие с теорией Эйнштейна была доведено до  $10^{-3}$  (VIKING), а затем и до  $2 \cdot 10^{-5}$  (Cassini).

**2.3.2. Радиопульсары в тесных двойных системах.** Уникальной лабораторией для проверки эффектов общей теории относительности оказались радиопульсары, входящие в состав тесных двойных систем. Действительно, поскольку радиопульсары представляют собой точные часы, движущиеся в гравитационном поле звезды-компаньона, то они позволяют получить уникальную информацию о кривизне пространства-времени. Дело в том, что среди более ста «двойных» радиопульсаров известны девять случаев, в которых звезда-компаньон также является нейтронной звездой. А в системе J0737–3039 обе нейтронные звезды на-