

к Солнцу на $1,5^\circ$. Интерферометр, содержащий в общей сложности семь антенн, работал на двух частотах, $\lambda \sim 10$ см и 3,7 см, и обладал максимальной базой 35 км. Достигнутая точность соответствия предсказанию ОТО (она же точность выполнения равенства $\gamma = 1$) в этом эксперименте $\sim 2\%$.

В ближайшие годы можно ожидать повышения разрешения за счет увеличения базы интерферометров (например, «Голдстоун» имеет базис ~ 4000 км и потенциальную точность измерения угловой координаты $\sim 0,0001''$ ²²⁾.

2) *Замедление скорости электромагнитного излучения в поле Солнца* (измерение параметра γ). Если эффект «отклонения луча» предсказан Эйнштейном и известен с момента создания ОТО, то аналогичный по своей природе эффект «задержки электромагнитного излучения» в гравитационном поле указан Шапиро лишь в 1964 г.³⁷ Первые опыты состояли в измерении задержки радиоимпульсов, посланных с Земли и отраженных обратно от Венеры и Меркурия^{2, 22, 23}. Расчет величины задержки (для случая, когда расстояние от Земли до Солнца r_A и от планеты-рефлектора до Солнца r_B много больше прицельного параметра радиолуча по отношению к Солнцу — b) приводит к формуле^{22, 23}

$$\Delta\tau \approx \frac{2}{c} \left[\frac{(1+\gamma) GM_\odot}{c^2} \ln \frac{4r_A r_B}{b^2} \right]. \quad (2.5)$$

Подстановка значений $r_A \sim r_B \sim 10^{13}$ см, $b \sim R_\odot^2 \sim 7 \cdot 10^{10}$ см дает величину $\Delta\tau \approx 200$ мксек при общем времени путешествия сигнала $\tau_0 \sim 30$ мин т. е. $\Delta\tau/\tau_0 \sim 10^{-7}$. Измерение расстояний r_A и r_B , входящих в (2.5), с такой точностью невозможно. К счастью, в этом нет необходимости. Как видно из (2.5), величина релятивистского запаздывания логарифмически меняется при прохождении планетой «дальнего соединения» (параметр b проходит через нуль). В эксперименте достаточно измерять дифференциальные вариации τ_0 . Однако чтобы отделить логарифмический эффект изменения τ_0 от траекторных вариаций задержки, требуется очень точное вычисление траектории планеты-рефлектора.

В первых опытах с Венерой и Меркурием (в 66—70 гг.) огромная счетная работа по траекторным вычислениям проводилась на ЭВМ (для иллюстрации укажем, что было привлечено около 300 начальных траекторных параметров, 400 радарных и 6000 оптических измерений. Разрешение при временных отсчетах было ~ 10 мксек, относительная точность $\sim 5 \cdot 10^{-9}$). Эффект был обнаружен и измерен в пределах двадцатипроцентного соответствия теории². Затем в качестве активных отражателей использовались космические станции «Маринер-6,7» во время полета к Марсу³⁸. Точность измерений повысилась до 4%, из которых 3% приходилось на долю неопределенности в оценке траекторных данных спутника из-за сноса солнечным ветром. Следующим этапом были измерения с Марсом, траектория которого оценивалась по данным «Маринера-9», вращающегося на орбите вокруг Марса^{39a}. Тяжелая планета практически не подвержена сносу за счет солнечного ветра, а «Маринер» жестко привязан к ее центру. Таким образом, здесь сочетались преимущества планетного и спутникового (активная ретрансляция) вариантов эксперимента. В итоге точность возросла до $\sim 2\%$. Наконец, последние измерения эффекта «задержки» с помощью орбитальных модулей «Викинг» дали следующие предварительные результаты: отклонение γ от единицы, если существует, то менее или порядка 1%. При условии продолжения измерений с «Викингами» в течение полного марсианского года есть^{39b} надежда, что ошибка в определении γ будет уменьшена до 0,2%^{39b}. Ограничение точности в настоящий момент связано с неполной информацией о свойствах околосолнечной

плазмы, поправку на задержку в которой приходится вносить при выполнении эксперимента. Уменьшить погрешность можно, используя два синхронных разночастотных ретранслятора на борту спутника.

Измерения на двух частотах должны обеспечить уровень точности 0,1% и лучше.

Итак, оба «электромагнитных» опыта по проверке ОТО завершились во многих независимых измерениях в ее пользу. Постньютоновская величина γ действительно равно единице с точностью $\sim 1-2\%$. Обычно по величине γ принято оценивать константу связи скалярно-тензорного поля $\tilde{\omega}$ в теории тяготения Бранса — Дики $\gamma = (1 + \tilde{\omega})/(2 + \tilde{\omega})$. Полагая $\gamma > 0,98$, легко найти $\tilde{\omega} > 48$ при достоверности $\sim 0,7$; для более высокого уровня достоверности 0,9 получается $\tilde{\omega} > 35$ ³⁶. Напомним, что первоначальная оценка Бранса — Дики $\tilde{\omega} \simeq 6$ (для объяснения уменьшенного релятивистского смещения перигелия Меркурия при наличии значительного квадрупольного момента Солнца²²) все время увеличивается. Поскольку при $\tilde{\omega} \rightarrow \infty$ теория Бранса — Дики переходит в ОТО, то уже сейчас потребность в ней начинает носить лишь академический характер. (Отсутствие эффекта Нордтведта, описанного в разделе 1, тоже приводит к оценке $\tilde{\omega} > 30$).

3) *Релятивистское смещение перигелия орбит* (измерение параметра β). Как известно, это — самое старое доказательство в пользу ОТО. Сам эффект аномального смещения перигелия был известен до теории Эйнштейна, ОТО объяснило его природу.

Расчет задачи двух тел на основе метрики (2.2) обнаруживает поворот орбитального эллипса на угол

$$\delta\varphi_0 = \frac{2-\beta+2\gamma}{3} \frac{6\pi GM_{\odot}}{a(1-e^2)c^2} \quad (2.6)$$

при каждом обходе пробного тела по орбите (a , e — большая полуось и эксцентриситет; T_0 — период обращения в годах). Очевидно, что удобны ближайшие к Солнцу планеты, имеющие малое a и большой эксцентриситет e .

Иное качество «смещение перигелия», по сравнению с эффектами распространения электромагнитного излучения в гравитационном поле, — это его зависимость от постньютоновского коэффициента β . Широко цитируемый результат для Меркурия, полученный Клеменсом⁴⁰, путем анализа многолетних астрономических наблюдений, дает значения $\sim 42,5'' + 0,9''$, что соответствует теоретической оценке поворота за сто лет

$$\delta\varphi_0 \frac{100}{T_0} \approx 43'' \cdot \frac{2-\beta+2\gamma}{3}.$$

В последние годы поднимался вопрос о несферичности Солнца, которая также должна была бы привести к смещению перигелия²³. Однако новая оценка несферичности (она может быть мерой квадрупольного момента Солнца) по данным лунной локации⁴¹ $J_2 \approx \Delta R_{\odot}/R_{\odot} < 6 \cdot 10^{-6}$ достаточно мала, чтобы пренебречь ее влиянием на «смещение перигелия».

Современный анализ выполнен под руководством Шапиро⁴². К старым астрономическим данным добавился большой объем систематических радарных измерений динамики внутренних планет Солнечной системы. Результат следующий: $(2 - \beta + 2\gamma)/3 = 1 \pm 0,01$. Привлекая значение $\gamma \sim 2\%$ из «электромагнитных» опытов, найдем, что $\beta = 1$ с точностью 7%. Надежда на повышение разрешения в этом важном эксперименте уже давно связывается с использованием искусственных спутников (см., напри-