



ISSN 1607–2855

Том 1 • № 2 • 2000 С. 29 – 37

УДК 530.12

## Эксперименты ОТО в Солнечной системе

М.П. Коркина, С.Б. Григорьев

Днепропетровский национальный университет, Украина

*В статье представлен обзор теоретических основ возможных гравитационных экспериментов по проверке общей теории относительности в Солнечной системе.*

*ЕКСПЕРИМЕНТИ ЗТВ В СОЛЯЧНІЙ СИСТЕМІ, Коркіна М.П., Григор'єв С.Б. – В статті представлено огляд теоретичних основ можливих гравітаційних експериментів по перевірці загальної теорії відносності в Сонячній системі.*

*EXPERIMENTS OF GENERAL RELATIVITY IN THE SOLAR SYSTEM, by Korkina M.P., Grigoryev S.B. – The review of theoretical basis of possible gravitational experiments on the verification of general relativity in the solar system is represented in the paper.*

### 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ ОТО

В первые полвека своего существования общая теория относительности (ОТО) почти не могла быть проверена экспериментально. Она была “раем для теоретиков и адом для экспериментаторов”. Позже развитие техники достигло уровня эйнштейновского гения и с 60-х годов положение дел с экспериментальным обоснованием ОТО существенно изменилось [1].

Сегодня непосредственная проверка эффектов ОТО в Солнечной системе дает нам надежную экспериментальную основу этой теории; т.к. несмотря на малость эффектов уже в 70-е годы эти эффекты можно было измерить с точностью до  $10^{-3}$  (0,1%). В настоящее время ОТО является основой для изучения пульсаров, квазаров, черных дыр, эволюции Вселенной. Однако наиболее точной является проверка предсказаний ОТО для движения тел в Солнечной системе [2, 3].

Существуют различные теоретические системы для анализа результатов гравитационных экспериментов. Наиболее широко используется параметризованный постньютоновский формализм (ППН-формализм), который применяется в дальнейшем при интерпретации результатов экспериментов.

Эксперименты условно можно разделить на две группы :

1) Эксперименты по проверке основ ОТО. К этой группе относятся:

- а) Проверка принципа универсальности свободного падения (Этвеш, Дикке, Брагинский. В экспериментах Дикке и Брагинского вместо Земного ускорения использовалось гравитационное ускорение, вызываемое Солнцем. (Ролл, Кротков и Дикке получили совпадение солнечных ускорений алюминия и золота с точностью  $10^{-11}$ , Брагинский и Панов – совпадение солнечных ускорений алюминия и платины с точностью  $10^{-12}$ ).
- б) Проверки метрических свойств пространства-времени определяющих измерения длины и времени; а также кинематику частиц. Физика элементарных частиц дает экспериментальное подтверждение существования метрики. Это эксперименты, в которых непосредственно измеряются интервалы времени, например: измерения увеличения времени распада нестабильных частиц, и эксперименты, обнаруживающие фундаментальную роль, которую играет группа

Лоренца в кинематике частиц. Наличие метрических свойств у пространства-времени является теоретической основой этих экспериментов.

- в) Проверка движения по геодезическим. Эксперимент Паунда-Рибке-Снайдера по измерению красного смещения как проверка геодезичности движения.
- г) Проверка принципа эквивалентности, в том числе проверка постоянства фундаментальных констант.

2) Собственно эксперименты по проверке предсказаний ОТО для движения тел Солнечной системы. Теоретической основой экспериментов является решение Шварцшильда в ППН формализме. Вместо плоскости, в которой вращается планета в поле Солнца в ньютоновой теории, в ОТО (в метрике Шварцшильда) имеем поверхность, образуемую вращающейся параболой, которая только на бесконечности переходит в плоскость. Для экспериментального исследования гравитации используются лучи света и радиоволны.

- а) Отклонение света Солнцем. Измерения при затмениях. Отклонение радиоволн Солнцем.
- б) Временная задержка радиолокационных сигналов. Эксперимент Шапиро. Экспериментальные данные по временной задержке радиосигналов дают результаты более точные, чем эксперименты по отклонению света и радиоволн. Экспериментальное значение  $1,02 \pm 0,08$  (теоретическое значение равно 1).
- в) Смещение перигелиев планет. Смещение перигелия Меркурия, обусловленное
  - 1) тем, что наблюдатель находится в неинерциальной системе отсчета;
  - 2) ньютоновским притяжением других планет;
  - 3) ОТО и сплюснутостью Солнца.

Возможны эксперименты по проверке:

- г) эффектов трех тел для орбиты Луны,
- д) прецессии гороскопов,
- е) пространственных вариаций гравитационной постоянной.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ ОТО

### 2.1. СМЕЩЕНИЕ ПЕРИГЕЛИЯ В ПОЛЕ ШВАРЦШИЛЬДА

Из принципа Гамильтона-Якоби получено уравнение, описывающее возможные траектории пробной частицы в метрике Шварцшильда. Это уравнение имеет вид:

$$U'' + U = \frac{r_g}{2} \frac{m^2 c^2}{M^2} + \frac{3}{2} r_g U^2, \quad (1)$$

где  $U = 1/r$ ,  $U' = dU/d\varphi$ ,  $r_g$  – гравитационный радиус Солнца,  $m$  и  $M$  – масса и момент пробной частицы (в нашем случае – планеты). Это уравнение нелинейное и точное его решение неизвестно. Поэтому будем искать приближенное решение.

Покажем, что в уравнении (1) второй член в правой части значительно меньше первого. Для этого преобразуем правую часть, подставив вместо  $M$  его значение:

$$\frac{r_g}{2} \frac{m^2 c^2}{M^2} + \frac{3}{2} r_g U^2 = \frac{r_g}{2} \frac{m^2 c^2}{m^2 v^2 r^2} + \frac{3}{2} r_g \frac{1}{r^2} = \frac{r_g}{2} \frac{c^2}{v^2} \frac{1}{r^2} \left( 1 + 3 \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (2)$$

Из (2) следует, что второй член правой части значительно меньше первого. Например, для Земли скорость движения по орбите равна  $v \approx 30$  км/сек, следовательно,  $3 \frac{v^2}{c^2} \approx 3 \cdot 10^{-8}$ . Поэтому решение уравнения (1) будем искать в виде поправки к известному решению уравнения

$$U_0'' + U_0 = \frac{r_g}{2} \frac{m^2 c^2}{M^2} = A. \quad (3)$$

Решение (3) описывает траектории движения частиц в ньютоновой гравитации:

$$U_0 = A(1 + e \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)). \quad (4)$$

Это – эллипсы, параболы, гиперболы в зависимости от величины эксцентриситета  $e$ . Мы будем искать поправки к эллиптической траектории.

Как известно, постоянная  $A$  выражается через параметры эллипса

$$A = \frac{1}{a(1 - e^2)}, \quad (5)$$

где  $a$  – большая полуось эллипса. Будем искать решение (1) в виде

$$U = U_0 + U_1, \quad (6)$$

где  $U_1 \ll U_0$ . (7)

Подставим выражение (6) в уравнение (1) и получим

$$U_0'' + U_0 + U_1'' + U_1 = A + \frac{3}{2}r_g(U_0 + U_1)^2. \quad (8)$$

Из (8) с учетом (3) и (7) имеем

$$U_1'' + U_1 = \frac{3}{2}r_g U_0^2 = \frac{3}{2}r_g A^2 (1 + 2e \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + e^2 \cos^2(\varphi - \varphi_0)). \quad (9)$$

Условие (7) позволило нам перейти от нелинейного уравнения к линейному. Т.к. однородное уравнение (9) совпадает с однородным уравнением (3), то необходимо найти только частное решение неоднородного уравнения (9).

Правая часть уравнения (9) состоит из трех слагаемых:

$\frac{3}{2}r_g A^2 \left(1 + \frac{e^2}{2}\right)$  – является постоянной и дает незначительную добавку к  $A$  в решении (4)

$$\left(\frac{3}{2}r_g A^2 \left(1 + \frac{e^2}{2}\right) \ll A\right);$$

$\frac{3}{2}r_g A^2 e^2 \cos 2(\varphi - \varphi_0)$  – также малая добавка, период которой не совпадает с периодом решения (4), а следовательно, не может накапливаться;

$3 \cdot r_g A^2 e \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)$  – малая добавка, период которой совпадает с периодом решения (4) и которая может накапливаться с течением времени.

Т.е. задача свелась к нахождению частного решения уравнения

$$U_1'' + U_1 = 3r_g A^2 e \cdot \cos \varphi. \quad (10)$$

Без потери общности можно положить  $\varphi_0 = 0$ .

Будем искать решение в виде

$$U_1 = \beta \cdot \varphi \cdot \sin \varphi, \quad (11)$$

где  $\beta$  – некоторая постоянная величина.

Подставим (11) в (10):

$$2\beta \cdot \cos \varphi = 3r_g A^2 e \cdot \cos \varphi,$$

откуда

$$U_1 = \frac{3r_g A^2 e}{2} \cdot \varphi \cdot \sin \varphi. \quad (12)$$

С учетом (12) и (4) общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$U = A \left(1 + e \cdot \cos \varphi + \frac{3}{2}r_g A e \cdot \varphi \cdot \sin \varphi\right) = A(1 + e \cdot \cos(\varphi - \delta\varphi)), \quad (13)$$

**Таблица 1.** Смещение перигелия, обусловленное ОТО для ближайших планет

Планеты	$a$ , км	$e$	$\Delta\varphi_m$	$\Delta\varphi_{экс}$	ошибка
Меркурий	$5,7 \cdot 10^7$	0,2	42",9	42",56	$\pm 0",94$
Земля	$15 \cdot 10^7$	0,016	3",84	4",6	$\pm 2",7$
Венера			8",6	8",4	$\pm 4",8$
Марс	$23 \cdot 10^7$	0,093	1",35		
Спутник	$10^4$	0,25	586",6		

где  $\delta\varphi = +\frac{3}{2}r_g A \cdot \varphi = \frac{3}{2} \cdot \frac{r_g \varphi}{a(1-e^2)}$ .

За период обращения  $\varphi = 2\pi$  эллипс поворачивается на угол

$$\Delta\varphi = \frac{3\pi \cdot r_g}{a(1-e^2)}. \quad (14)$$

Наблюдения за движением планет показывают, что в действительности планеты движутся не по эллипсам, а по кривым, которые называются розетками. Наибольшая часть отклонения от эллипса обусловлена тем, что мы наблюдаем за движением планет находясь в неинерциальной системе отсчета.

Для Меркурия наблюдаемые данные следующие:

Полное наблюдаемое смещение за столетие  $5599",74 \pm 0",41$ ;

Вклад в смещение, обусловленный тем, что наблюдатель находится не в инерциальной системе вдали от Солнца (1947г.)  $5025",645 \pm 0",50$ ;

Смещение, обусловленное ньютоновским притяжением других планет  $531",54 \pm 0",68$ ;

Остаются смещение (ОТО + сплюснутость Солнца)  $42",56 \pm 0",94$ .

Поскольку  $\Delta\varphi$  зависит от  $e$  и при больших  $e$  может быть существенным, казалось перспективным проверить эффект смещения перигелия на спутниках, т.к. период обращения спутника значительно меньше, чем планет. Однако для измерений необходимо улучшить стабильность и плоскостность траекторий, учесть эффект, обусловленный сплюснутостью Земли, прецессии земной оси и т.д.

## 2.2. ОТКЛОНЕНИЕ ЛУЧЕЙ СВЕТА В МЕТРИКЕ ШВАРЦШИЛЬДА

Для лучей света, т.к.  $m = 0$  из принципа Гамильтона-Якоби вместо (1) имеем

$$U'' + U = \frac{3}{2}r_g U^2, \quad (15)$$

В классической физике (теория Ньютона) имеем для лучей света уравнение

$$U_0'' + U_0 = 0, \quad (16)$$

решение которого  $U_0 = b \cos \varphi + a \sin \varphi$  – это прямая линия. Рассмотрим движение, параллельное оси  $y$ , тогда

$$U_0 = b \cdot \cos \varphi \rightarrow \frac{1}{b} = r \cdot \cos \varphi = x, \text{ т.е. } x = const. \quad (17)$$

Как и при вычислении смещения перигелия, считаем, что

$$U = U_0 + U_1, \quad (18)$$

где

$$U_1 \ll U_0. \quad (19)$$

Подставим выражение (17) в уравнение (15) и получим

$$U_0'' + U_0 + U_1'' + U_1 = \frac{3}{2}r_g (U_0 + U_1)^2 \quad (20)$$

Из (20) с учетом (16) и (19) имеем

$$U_1'' + U_1 = \frac{3}{2}r_g U_0^2 = \frac{3}{2}r_g b^2 \cos^2 \varphi = \frac{3}{4}r_g b^2 (1 + \cos 2\varphi) \quad (21)$$

Решение уравнения (21) имеем в виде:

$$U_1 = \frac{3}{4} r_g b^2 + k \cos 2\varphi, \quad (22)$$

где  $k$  – некоторая постоянная.

Подставим выражение (22) в уравнение (21) и получим для  $k$  значение, равное

$$k = -\frac{1}{4} r_g b^2 \cos 2\varphi. \quad (23)$$

Подставив (22) и (17) в выражение (18) и учитывая значение  $k$  (23), получим:

$$U = b \cos \varphi + \frac{3}{4} r_g b^2 - \frac{1}{4} r_g b^2 \cos 2\varphi. \quad (24)$$

Преобразуем выражение (24). Перейдем к декартовой системе координат и подставим вместо  $r = \frac{1}{U}$ .

$$\begin{aligned} \frac{1}{b} &= r \cdot \cos \varphi + \frac{1}{4} r_g b \cdot [3 \cdot r - r \cdot (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi)] = \\ &= x + \frac{1}{4} \frac{r_g b}{\sqrt{x^2 + y^2}} [3(x^2 + y^2) - x^2 + y^2] = x + \frac{1}{2} \frac{r_g b (x^2 + 2y^2)}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Из выражения (25) следует, что  $\frac{1}{b} = x$  – это прямая, а второй член определяет отклонение от прямой. Мы рассматриваем луч света, который идет от  $y = -\infty$  до  $y = +\infty$ . Поэтому посмотрим, какой вид будет иметь кривая (25) при  $|y| \gg x$ . При  $y < 0$  из (25) имеем  $\frac{1}{b} = x - r_g b \cdot y$ , при  $y > 0$  –  $\frac{1}{b} = x + r_g b \cdot y$ , т.е. на достаточно большом расстоянии имеем две различные прямые, направленные под углом к прямой  $x = \frac{1}{b} = R$  как показано на рис.1.

При  $y < 0$   $\frac{\alpha}{2} = \frac{r_g}{R}$

При  $y > 0$   $\frac{\alpha}{2} = -\frac{r_g}{R}$ .

Таким образом, полный угол, на который отклоняется луч света, равен

$$\alpha = \frac{2r_g}{R} = \frac{4\gamma m}{c^2 R}.$$

Для светового луча звезды, проходящего у края солнечного диска  $\alpha = 1",75$ . Для звезд, находящихся на расстоянии  $R$   $\alpha = 1",75 \cdot \frac{R_c}{R}$ , где  $R_c$  – радиус Солнца.

Для лучей, проходящих не вблизи края эффект уменьшается в  $R_c/R$  раз. Поэтому возможность наблюдения ограничена теми звездами, лучи от которых проходят вблизи края солнечного диска. Однако, свет внутренней короны Солнца мешает наблюдению на расстояниях ближе, чем  $2R_c$ . Для хорошей проверки необходимо, чтобы звезды были расположены вокруг Солнца и обладали достаточной яркостью. К сожалению, лишь немногие звезды обладают этим качеством. Наблюдать этот эффект в оптическом диапазоне можно только при солнечных затмениях. Впервые экспериментально отклонение световых лучей было обнаружено в 1919 г.

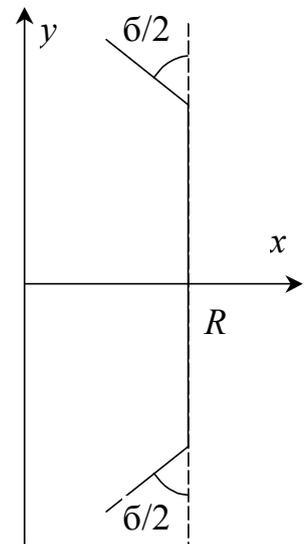


Рис.1. Представления, используемые при выводе отклонения лучей в гравитационном поле.

экспедицией, организованной Эддингтоном. Далее измерения проводились во время почти всех затмений и были связаны с такими трудностями как плохая погода, оптические искажения из-за вариаций температуры, а также «странной склонности затмений достигать максимального времени то в джунглях, то посреди океана, то в пустынях, то в арктической тундре». Разброс отклонений от  $1'',43$  до  $2'',7$ . (Среднее  $1'',87 \pm 0'',08$ ).

С развитием радиоастрономии ситуация существенно улучшилась. Каждый год 8 октября Солнце, если смотреть с Земли, проходит перед квазаром 3C279. Следя за угловым расстоянием между 3C279 и соседним квазаром 3C273 радиоастрономы измеряют отклонение радиоволн, вызванное Солнцем. Отношение наблюдаемого отклонения к теоретическому

$$\begin{array}{ll} 1,01 \pm 0,12, & 1,04 \pm 0,05 \quad (1969 \text{ г.}) \\ & 1,07 \pm 0,17 \quad (1970 \text{ г.}) \end{array}$$

### 2.3. КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ

Красное смещение – это изменение частоты вследствие изменения потенциала гравитационного поля. Рассмотрим эффект красного смещения на основе решения Шварцшильда. Предполагается, что внутренние свойства атома не изменяются при наличии гравитационного поля. Собственная частота атома

$$\nu_0 = \frac{dN}{d\tau},$$

где  $d\tau$  – собственное время,  $dN$  – число колебаний за время  $d\tau$ .

Система координат, в которой звезда, на которой находятся излучающие атомы, покоится, это система координат Шварцшильда:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r_g}{r}} - r^2 d\sigma^2; \quad dt = dt \sqrt{1 - \frac{r_g}{r}}, \quad (27)$$

где  $dt$  – время бесконечно удаленного наблюдателя. Частота, измеряемая наблюдателем, равна

$$\nu = \frac{dN}{dt}. \quad (28)$$

Разделим (26) на (28) и учтем (27). В результате получим

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{r_g}{r}}. \quad (29)$$

Т.к.  $r_g \ll r$  формулу (29) можно переписать в виде:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = -\frac{r_g}{2r} = -\frac{\gamma M}{c^2 r}, \quad (30)$$

где в знаменателе заменим  $\nu_0$  на  $\nu$ , т.к. учет разницы между ними – это учет второго приближения, а мы ограничиваемся первым.

Красное смещение может быть получено из принципа эквивалентности. Если в движущейся системе  $S'$  атом излучает частоту  $\nu'$ , то наблюдатель в системе  $S$  принимает частоту

$$\nu = \nu' \frac{\sqrt{1 - v/c}}{\sqrt{1 + v/c}} \approx \nu' \left(1 - \frac{v}{c}\right), \quad (31)$$

если система  $S'$  удаляется от системы  $S$ . Пусть система  $S'$  движется с ускорением, формула (31) для частоты будет такой же. Ускоренную систему согласно принципу эквивалентности можно заменить гравитационным полем. Тогда

$$v = gt, \quad (32)$$

где  $g$  – ускорение,  $l = ct$  – путь, который проходит луч света.

Подставив (32) в (31) получим

$$v = v' \left( 1 - \frac{gl}{c^2} \right),$$

откуда

$$\frac{\Delta v}{v} = -\frac{gl}{c^2}, \quad (33)$$

$g \cdot l$  – изменение гравитационного потенциала на расстоянии  $l$ , т.е.

$$g \cdot l = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{\gamma M_1}{R_1} + \frac{\gamma M_2}{R_2}. \quad (34)$$

Из (33) и (34)

$$\frac{\Delta v}{v} = -\frac{\gamma}{c^2} \left( \frac{M_2}{R_2} - \frac{M_1}{R_1} \right), \quad (35)$$

$\varphi_1$  – гравитационный потенциал в точке, где находится наблюдатель,  $\varphi_2$  – в точке, где находится источник. Смещение может быть и фиолетовым, если наблюдатель находится в более сильном гравитационном поле, чем источник.

Для Солнца красное смещение сильно отличается от предсказываемого теоретически. Оно зависит от места на Солнце, излучающего свет. Только для края Солнечного диска имеем согласие с экспериментом.

Слои солнечной атмосферы находятся в непрерывном движении вследствие конвекции. Горячие потоки идут от Солнца, холодные к Солнцу. Это создает доплер-эффект, который приводит к фиолетовому смещению.

Для любой другой звезды смещение частоты – это некоторое интегральное значение по всему звездному диску. Поэтому экспериментальное значение не должно быть простым образом связано с теоретическим.

В 1960 г. было измерено гравитационное красное смещение в земных условиях, в лаборатории.

Если расстояние между источником и приемником равно 10 м, то из формулы (33) следует, что

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{10 \cdot 10}{9 \cdot 10^{17}} \approx 10^{-15}.$$

Таким образом смещение можно обнаружить только при применении таких источников, у которых естественная ширина линии по порядку величины не превышает  $10^{-15}$ . Такая ширина линий у источников в эффекте Мессбауэра (1958 г.). Эффект Мессбауэра – это резонансное поглощение  $\gamma$  излучения, испускаемого возбужденными атомами. Он возможен при низкой температуре, когда нет отдачи. Пик резонанса очень острый, при движении источника или в гравитационном поле происходит смещение частоты и резонанс нарушается. Сущность эксперимента состоит в сравнении источников  $\gamma$ -лучей в точках, находящихся на некотором расстоянии по вертикали.

Паунд и Ребке впервые использовали эффект Мессбауэра для измерения поперечного эффекта Доплера и указали на возможность измерения гравитационного красного смещения.

Им принадлежит самый точный эксперимент по красному смещению (1960 г.), затем он был усовершенствован Паундом и Снайдером (1965 г.).

Окончательный результат экспериментов составил  $0,9990 \pm 0,0076$  от теоретического значения.

#### 2.4. ВРЕМЕННАЯ ЗАДЕРЖКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Пусть радиолокационный передатчик на земле посылает электромагнитный сигнал к отражателю, расположенному в другом месте Солнечной системы и отражатель возвращает сигнал на Землю. Считаем, что отражатель и Земля не вращаются, а покоятся в статическом сферически-симметричном поле Солнца. Гравитационное влияние других планет на электромагнитные волны очень слабо, его невозможно обнаружить экспериментально. Эффекты дисперсии в солнечном ветре и в солнечной короне существенны, на них необходимо внести поправки, однако здесь они не будут обсуждаться. Рассчитаем эффект для радиального движения электромагнитных сигналов.

Из решения Шварцшильда для рассматриваемого случая имеем:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{-1} dr^2 = 0. \quad (36)$$

Откуда получаем

$$dt = \frac{dr}{1 - \frac{r_g}{r}}. \quad (37)$$

Интегрируем выражение (37)

$$t = \int_{r_1}^{r_2} \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{-1} dr = r_2 - r_1 + r_g \ln \frac{r_2 - r_g}{r_1 - r_g}, \quad (38)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – координаты Земли и отражателя. Из (38) следует, что временная задержка, обусловленная

ОТО, равна  $\Delta t = r_g \ln \frac{r_2 - r_g}{r_1 - r_g}$ .

Экспериментальные данные:

В 1970 г. Шапиро и др. получены данные эксперимента, где в качестве отражателя использованы Меркурий и Венера ( $1,015 \pm 0,02$ ).

В 1971 г. Андерсоном получены данные, где в качестве отражателя использован Маринер VI и VII ( $1,00 \pm 0,014$ ).

**Таблица 2.** Перечень экспериментов

Тип эксперимента	Описание эксперимента
I. Проверки основ общей теории относительности	<p>Универсальности свободного падения (эксперименты Этвеша-Дикке-Брагинского)</p> <p>Метрических свойств пространства-времени (замедление времени распада частиц, значение лоренцевой группы в кинематике частиц и др.)</p> <p>Поиски новых медленно убывающих с расстоянием полей, взаимодействующих непосредственно с веществом (эксперимент Хьюза-Древера, эксперименты по поиску движения относительно эфира)</p> <p>Эксперименты по гравитационному красному смещению</p> <p>Постоянство во времени и пространстве негравитационных физических констант</p>
II. Постньютоновские эксперименты («в Солнечной системе»)	<p>Отклонение Солнцем света и радиоволн</p> <p>Релятивистская задержка времени распространения радиолокационного луча туда и обратно при прохождении вблизи Солнца</p> <p>Смещение перигелиев и периодические возмущения планетарных орбит</p> <p>Эффекты трех тел на лунной орбите</p> <p>Прецессия гироскопов, «геодезическая прецессия» и прецессия за счет увлечения инерциальных систем отсчета вращением Земли</p> <p>Пространственные вариации гравитационной постоянной Кавендиша в Солнечной системе</p> <p>Зависимость гравитационной постоянной Кавендиша от химического состава тел</p> <p>Земные приливы с сидерическими периодами</p> <p>Годовые вариации скорости вращения Земли</p> <p>Периодические изменения расстояния между Землей и Луной за счет нарушения геодезичности движения</p>
III. Космологические наблюдения	<p>Изменение гравитационной постоянной Кавендиша со временем в Солнечной системе</p> <p>Крупномасштабные свойства Вселенной (расширение, изотропия, однородность, существование и свойства космического микроволнового излучения и др.)</p> <p>Согласованность различных определений возраста Вселенной (возраст по расширению, возраст самых старых звезд, возраст солнечной системы)</p>
IV. Гравитационно-волновые эксперименты	<p>Существование волн.</p> <p>Возможные свойства скорость распространения, поляризационные свойства и др.</p>

**Таблица 3.** Смещение перигелия Меркурия за столетие.

I. Данные для Меркурия, полученные из оптических измерений (ОТО без сплюснутости Солнца предсказывает 43",03 за столетие)	
Название величины	Значение
Полное наблюдаемое смещение за столетие	5599",74 ± 0",41
Вклад в смещение, обусловленный тем, что наблюдатель находится не в инерциальной системе отсчета вдали от Солнца («общая прецессия», рассчитанная в 1947 году)	5025",645 ± 0",50
Смещение за столетие, обусловленное ньютоновским притяжением других планет	531",54 ± 0",68
Остающееся смещение за столетие, которое следует приписать ОТО и сплюснутости Солнца	42",56 ± 0",94
Остающееся смещение, если использовать для «общей прецессии» значение 1973 г.	41",4 ± 0",90
Соответствующее значение $\lambda_p$	$\lambda_p = 0,96 \pm 0,02$
II. Результаты 1970 года, полученные Шапиро и др.	
Значения $\lambda_p$ , полученные из пересмотра совокупности всех имеющихся оптических данных и сопоставления их с радиолокационными данными	$\lambda_{p\text{Меркурия}} = 1,00 \pm 0,01$ $\lambda_{p\text{Марса}} = 1,07 \pm 0,10$
Значение квадрупольного момента $J_2$ , полученное путем сравнения наблюдаемых смещений перигелиев Меркурия и Марса	$J_2 \leq 3 \cdot 10^{-5}$
III. Теоретические следствия из результатов Шапиро	
Значение $(2 - \beta + 2\gamma)/3$	$1,00^{+0,01}_{-0,10}$
Значение $\rho$ , полученное путем сопоставления $\epsilon$ и $\gamma$ из экспериментов по временной задержке	$1,00^{+0,4}_{-0,2}$

**Таблица 4.** Задержка радиолокационных сигналов

Даты наблюдений	Радиолокационные телескопы	Отражатель	Экспериментаторы	Длины волн, в см.	Экспериментальные результаты	
					$\frac{1+\gamma}{2}$	наблюдаемое отклонение предсказание Эйнштейна
ноябрь 1966 г. – август 1967 г.	Хейстэк (МТИ)	Венера и Меркурий	Шапиро	3,8	0,9	–
1967 г. – конец 1970 г.	Хейстэк (МТИ) и Аресибо (Корнель)	Венера и Меркурий	Шапиро, Эш и др.	3,8 и 70	1,015	± 0,02
октябрь 1969 г. – январь 1971 г.	Система по исследованию дальнего космоса (НАСА)	Космические корабли Маринер VI и Маринер VII	Андерсон и др.	14	1,00	± 0,014

**Таблица 4.**

Даты наблюдений	Обсерватория	Экспериментаторы	Число телескопов и расстояние между ними	Длины волн, в см.	Экспериментальные результаты	
					$\frac{1+\gamma}{2}$	наблюдаемое отклонение предсказание Эйнштейна
30 сент. – 15 окт. 1969 г.	Оуэнская долина (Калтех)	Сейелстад, Шрамек, Вейлер	2; 1,07 км	3,1	1,01	± 0,12
2 окт. – 10 окт. 1969 г.	Голдстоун (Калтех – ЛРД)	Мулеман, Экере, Фомалон	2; 21,56 км	12,5	1,04	± 0,05
2 окт. – 12 окт. 1970 г.	Национальная радионастрономическая обсерватория (США)	Шрамек	3; 0,80 км, 1,90 км, 2,70 км	11,1 3,7	0,90	± 0,05
30 сент. – 15 окт. 1970 г.	Маллардская радионастрономическая обсерватория (Кембридж)	Хилл	3; 0,66 км, 1,41 км	11,1 6,0	1,07	± 0,17

1. Мизнер Ч., Торн К., Уиллер Дж. Гравитация, в 3-х томах, Т.3. – М.: Мир, 1977.

2. Уилл К. Теория и эксперимент в гравитационной физике. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.

3. Экспериментальные тесты теории гравитация / под ред. В.Б.Брагинского и В.И.Денисова. – М.: МГУ, 1989. – 254 с.  
Поступила в редакцию 25.06.2000