

НОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ СОЛНЦА

Ю. М. Кушнир и В. С. Фурсов, Москва

Одним из замечательных следствий общей теории относительности, как известно, является необходимость отклонения светового луча в поле тяготеющей массы. Формула, даваемая для угла отклонения общей теорией относительности в той форме, как она развита Эйнштейном в 1916 г., имеет вид:

$$E = \frac{4\kappa M}{c^2 \Delta};$$

здесь

κ — гравитационная постоянная $= 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ сек}^{-2}$; M — тяготеющая масса в граммах; Δ — расстояние по нормали от луча, до центра массы; c — скорость света $3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$. Величина E будет достаточно заметной только в том случае, если тяготеющая масса M весьма велика.

Для светового луча, проходящего у самого края солнца, формула (1) дает следующее числовое значение:

$$E = 1'', 75.$$

Первое удачное наблюдение такого отклонения удалось произвести в 1919 г. двум английским экспедициям: одной в Сев. Бразилии (Собрале), другой на острове Принчипе у берегов Африки. При этом получились следующие результаты:

экспед. в Собрале — $E = 1'', 98 \pm 0'', 18$,

экспед. на о. Принчипе — $E = 1'', 61 \pm 0'', 45$,

т. е. величины, хорошо согласующиеся с теоретической.

Еще более поразительные данные были получены во время затмения в 1922 г. в Австралии экспедицией американцев Кэмпбелла и Трюмплера.

Экспед. в Австралии — $E = 1'',78 \pm 0'',16$.

Однако многочисленные возражения и сомнения в результатах этих экспедиций сделали необходимым повторение наблюдений с максимальными предосторожностями, чтобы по возможности исключить все посторонние причины, могущие вызвать смещение. С этой целью в 1929 г. на Сев. Суматру (в Такенгон) отправилась экспедиция немецких астрономов под руководством Фрейндлиха. Место экспедиции 1929 года было выбрано из тех соображений, что здесь количество безоблачных дней, влажность воздуха и прочие метеорологические условия оказались наиболее благоприятнейшими. Снимки неба производились при помощи двух горизонтально установленных труб, находящихся в одной плоскости и образующих между собой некоторый угол. Объективы труб обращены были к вершине этого угла. Здесь помещался целостат. Две трубы служили для одновременной съемки двух участков неба: одного, в котором находилось Солнце, и второго, расположенного на 25° небесной сферы от него. Диаметр объективов труб был 20 см, фокусное расстояние 8,5 м; размер фотопластин 45×45 см. Область, фотографируемая каждой пластиной, охватывала $3^\circ \times 3^\circ$ небесной сферы.

Для контроля времени экспедиция была снабжена небольшой приемной радиостанцией, позволявшей принимать европейские и колониальные станции. Вся установка была тщательно защищена от сотрясений и температурных влияний.

Первой трубой были сделаны следующие снимки:

1) Солнце во время затмения и окружающие его звезды — так называемое поле затмения и 2) те же самые звезды в том же самом положении, но без Солнца (ночью), около полугода спустя. Второй трубой: 1) звезды некоторого участка неба на 25° от Солнца и находящиеся в том же зенитном расстоянии, что и Солнце, — так называемое контрольное поле (снималось одновременно со снимком

на первой трубе) и 2) те же самые звезды в том же самом положении, ночью, около полугода спустя.

Предполагая, что условия наблюдения в день затмения и четыре месяца спустя были совершенно одинаковы, можно получить:

А — сравнением снимков 1 и 2, сделанных первой трубой. величины смещений звезд, вызванных тем, что во время снимка первого свет звезд отклонялся Солнцем, во время же второго снимка — не отклонялся;

В — сравнением снимков первого и второго, сделанных второю трубой, убедиться в тождественности обоих снимков, ибо фотографируемые звезды лежали на 25° от Солнца, т. е. в области, где отклонение их лучей Солнцем из-за дальности действия практически отсутствует. Предположение о тождестве условий опыта во время снимков первого и второго практически, однако, неосуществимо, ибо, как сказано, между этими снимками проходит промежуток в несколько месяцев и было бы неосмотрительно предположить, что вся аппаратура и все условия остались совершенно неизмененными. Одной из причин, обуславливающих это изменение, является изменение масштаба, связанное с вариациями, хотя бы и незначительными, в фокусировке вследствие различия температурных условий во время обоих снимков. Чем дальше будет расположена звезда от центра пластины, тем больше в ней будет сказываться изменение масштаба, связанное с изменением фокусировки. Для смещения же звезды вследствие светового отклонения, в предположении, что Солнце приблизительно находится в центре пластины, будем иметь как раз обратную картину: оно тем больше, чем ближе звезда к Солнцу. Разделение этих двух эффектов — смещения вследствие изменения масштаба и смещения вследствие отклонения светового луча — весьма затруднительно.

Чтобы иметь возможность учесть изменение масштаба, можно идти двумя путями:

1. Снять на одну и ту же пластину одно за другим поле затмения и затем какой-нибудь удаленный от Солнца участок. На вторую пластину полгода спустя снять снова

одно за другим оба участка неба. Тогда, сравнивая снимки удаленного от Солнца участка, можно получить представление об изменении масштаба. Если масштаб не изменился, то при наложении друг на друга обоих снимков все звезды должны совпасть.

Этот способ был выбран работниками экспедиции для астрографа — подвижной трубы, направленной непосредственно на небо и имеющей большое поле зрения (назначение астрографа см. ниже).

2. Второй способ для нахождения изменения масштаба, принятый экспедицией для горизонтальных труб, заключался в следующем: на фотографическую пластину каждой трубы, прежде чем снять на нее тот или иной участок неба, снималось изображение особой нанесенной на стекле сетки. Звездные участки неба, снятые в день затмения, а именно — поле затмения и контрольное поле, сфотографированы были в том же самом положении небесной сферы уже около полугода спустя в отсутствие Солнца — ночью. Снимки эти были произведены той же самой аппаратурой и на том же самом месте (для этой цели в Такенгоне была оставлена вся установка под наблюдением одного из участников экспедиции К л ю б е р а). Как показали специальные опыты, за это время установка почти не изменилась.

В течение 298 сек. длительности затмения сделаны были снимки следующих экспозиций на первой трубе: 1) снимок в 40 сек. 2) в 90 сек., 3) в 60 сек., 4) в 40 сек.

На второй трубе: 1) снимок в 40 сек., 2) в 90 сек., 3) в 60 сек.

Так как расположение звезд вокруг Солнца было несимметрично, то снимки были сделаны так, что Солнце находилось не в центре пластины, а несколько смещенным, с таким расчетом, чтобы в поле зрения было возможно больше звезд.

Времена ночных экспозиций для каждой трубы были: 20, 40, 60, 90 и 180 сек. Кроме того на каждую пластину были еще дополнительно сфотографированы Плеяды (см. ниже).

Метод измерения был выбран следующий: ночью были

произведены не только прямые снимки для сравнения поля затмения и контрольного поля, но еще два снимка через стекло пластинки, на которых получилось зеркальное изображение обоих участков неба. К одной из этих пластинок, например поля затмения, слой к слою прижималась сначала пластинка, снятая в день затмения, и сравнивалась; затем таким же образом сравнивалась пластинка, снятая ночью; из результатов сравнения уже вычислением получалось необходимое сравнение дневных и ночных снимков. Измерения производились на специально для этой цели сконструированном аппарате; причем всего было произведено 100 000 отдельных измерений. Работа была произведена дважды двумя наблюдателями независимо друг от друга. Цель всех измерений сводилась к определению смещений положений звезд на пластинках, снятых в день затмения, относительно соответствующих снятым ночью.

Причины, которые изменяют положения звезд на небе при сравнении двух в разное время произведенных снимков, следующие:

1. Различное влияние рефракции.
2. Различное влияние астрономической аберрации.
3. Различный наклон плоскости пластинки к оптической оси трубы.
4. Различное значение масштабов на пластинках, обусловленное различным фокусным расстоянием трубы во время обоих снимков.

И, наконец, в этом специальном случае снимка в окружении Солнца во время полного затмения:

5. Влияние неизвестных физических действий на распространение света около Солнца.

Пункты 1 и 2 точно учитывались известными способами. Пункт 3 заранее учтен быть не мог по той причине, что для того, чтобы учесть влияние наклона плоскости пластинки к оптической оси, надо знать координаты основания перпендикуляра, опущенного из середины объектива на плоскость пластинки; последние не могли быть определены из-за сильного почернения пластинок около середины, обусловленного изображением солнечной короны. Поэтому пункт 3

принимался во внимание уже непосредственно во время сравнения.

Для исключения влияния различного значения масштабов производились специальные сравнения изображений сетки на соответственных парах пластинок, так что вся измерительная работа состояла из двух частей: сравнения размеров сеток и сравнения положения звезд.

На снимках поля затмения получилось 17 и соответственно 18 звезд, положение которых надежно можно было определить. При употреблявшемся формате пластинок одна дуговая минута соответствовала линейному расстоянию около 2,5 мм, поэтому смещения вследствие предполагаемого эффекта Эйнштейна на пластинке должны быть порядка сотых долей миллиметра, измерительный же аппарат давал отсчеты с точностью до половины микрона. Точное определение абсолютной цены делений измерительного аппарата в дуговых единицах производилось при помощи измерения расстояния между двумя звездами группы Плеяд, снятыми на все ночные снимки и угловое расстояние между которыми весьма точно известно.

Первое сравнение положений звезд производилось без какого бы то ни было предположения о световом отклонении, а именно: полученные разности координат, освобожденные от влияний рефракции, аберрации и различного значения масштабов, предполагались обусловленными лишь различной ориентацией координатных осей (сдвиг и поворот) и влиянием неучтенного пункта 3 и поэтому представлялись в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= C + By_i + px_i^2 + qx_iy_i; \\ \Delta y_i &= D - Bx_i + px_iy_i + qy_i^2.\end{aligned}$$

Здесь C и D учитывают смещение начала, B — поворот осей, а p и q — различный наклон пластинок к оптической оси.

Подобные уравнения писались для всех звезд, и из них методом наименьших квадратов находились значения B , C , D , p и q . Затем эти значения вставлялись опять в уравнения, и тогда уже находился остаточный член смещения каждой звезды. В случае отсутствия светового откло-

нения остаточный член должен иметь вид случайных ошибок, но уже с первого взгляда видно (см. рис. 1), что остаточный член имеет явно выраженную закономерность — систематическое смещение звезд от центра Солнца, что совершенно определенно говорит за наличие отклонения светового луча. Поэтому было произведено второе сравне-

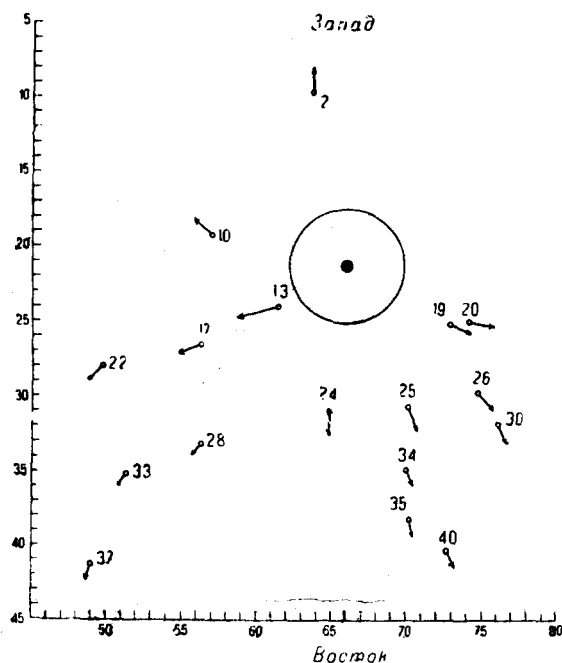


Рис. 1. Векторная диаграмма смещений звезд поля затмения.

ние уже с учетом светового отклонения в виде прибавления в выражения Δx_i и Δy_i соответственно членов $\frac{E}{r_i} \frac{x_i}{r_i}$ и $\frac{E}{r_i} \frac{y_i}{r_i}$, где E — значение светового отклонения в непосредственной близости Солнца, x_i , y_i и r_i — координаты и радиус-вектор звезды, причем за начало выбран центр Солнца. После этого второго сравнения, которое в числе остальных неизвестных дает и E , остаточный член действительно принимает вид случайных ошибок (см. рис. 2). И сумма квадратов

ошибок по отношению к первому сравнению уменьшается приблизительно в семь раз.

Таким образом были произведены сравнения всех четырех пар пластинок, в результате которых для E получились следующие значения:

Из пластинки с экспозицией 40 сек.	$E = 2'',25 \pm 0'',19$
" " " " 90 "	$E = 2'',17 \pm 0'',20$
" " " " 60 "	$E = 2'',61 \pm 0'',26$
" " " " 40 "	$E = 1'',81 \pm 0'',19$
Среднее значение $E = 2'',24 \pm 0'',10$	

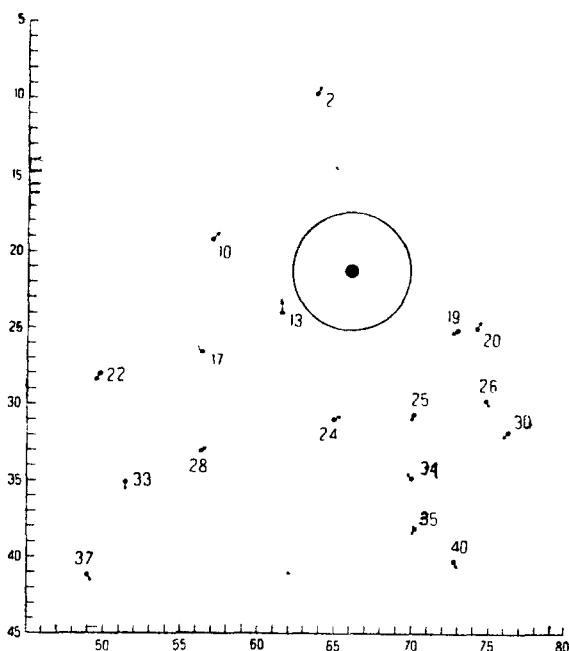


Рис. 2. Ошибки в поле зрения.

Сравнительно большие значения отклонения E от среднего, полученные на некоторых пластинках (пластинка 60 и 40 а — $\pm 0'',4$), объясняются не неточностью измерений такого порядка, а тем, что большинство звезд находилось приблизительно в среднем на расстоянии около четырех радиусов от центра Солнца, и поэтому E приходилось находить экстраполяцией на край Солнца, так что отклонения

от среднего порядка $\pm 0",4$ соответствовало отклонениям действительно измеряемых величин приблизительно на $\pm 0",1$.

В нижеприводимой таблице сведены результаты измерения смещений отдельных звезд на каждой пластинке, их средние значения и сравнения с величинами, требуемыми теорией относительности.

На рис. 3 представлены графически средние значения отклонений отдельных звезд из четырех пластинок. Как

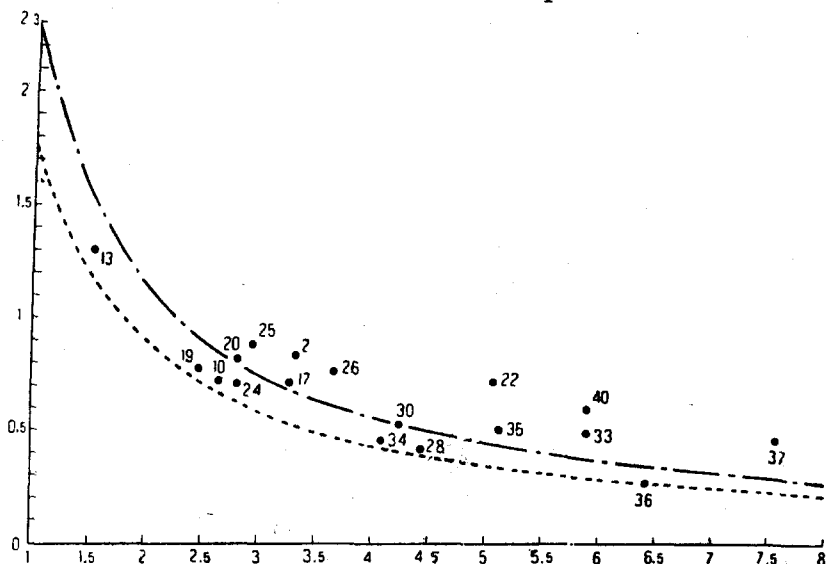


Рис. 3. Смещения звезд в зависимости от расстояния. Пунктирная гипербола — требуемая теорией относительности; штрих-пунктирная — полученная из наблюдений.

видно, точки явно показывают (особенно звезда 13, отстоящая всего на половину радиуса от поверхности Солнца) возрастание отклонения при приближении к Солнцу и довольно хорошо аппроксимируются штрих-пунктирной гиперболой. Из этого можно заключить, что здесь не имеется наложения на эффект, следующий закону обратной пропорциональности расстояния от Солнца, другого, по порядку величины такого же, но функционально существенно отличающегося эффекта.

Векторные смещения звезд имеют и тангенциальные ком-

Таблица радиальных смещений всех звезд на всех пластинках поля затмения

Звезда № по каталогу	Расстоя- ние от центра Солнца	Пласт. с экспоз. 40	Пласт. с экспоз. 90	Пласт. с экспоз. 60	Пласт. с экспоз. 40a	Среднее от- клонение из 4 пласт.	Значение, получаемое из теории относит.	Наблюден- ное минус релятивист.	Угол наблюд. вект. относ. радиуса- вектора
2	3,25	+0",67	+1",04	+0",74	+0",90	+0",84	0",54	+0",30	+10°
10	2,62	+0,78	+0,87	+0,74	+0,58	+0,74	0,67	+0,07	+17
13	1,52	+1,33	+1,00	+1,56	—	+1,30	1,15	+0,15	+17
17	3,20	+0,90	+0,74	—	+0,54	+0,73	0,55	+0,18	+7
19	2,42	+0,58	+0,75	+1,22	+0,59	+0,78	0,72	+0,06	+2
20	2,76	+0,65	+0,71	+1,20	+0,76	+0,83	0,63	+0,20	—9
22	5,06	+0,57	+0,61	+1,03	+0,61	+0,70	0,34	+0,36	—3
24	2,76	+0,92	+0,68	+0,92	+0,48	+0,75	0,63	+0,12	—4
25	2,86	+1,20	+1,20	+0,63	+0,49	+0,88	0,61	+0,27	+10
26	3,53	+0,96	+0,72	+0,74	+0,68	+0,78	0,49	+0,29	+6
28	4,42	+0,42	+0,29	+0,70	+0,29	+0,42	0,39	+0,03	—1
30	4,21	+0,56	+0,65	+0,47	+0,46	+0,54	0,41	+0,13	+21
33	5,89	+0,49	+0,65	+0,60	+0,30	+0,51	0,30	+0,21	—17
34	4,04	+0,50	+0,55	+0,67	+0,22	+0,48	0,43	+0,05	+8
35	5,08	+0,43	+0,64	+0,51	+0,41	+0,50	0,34	+0,16	+9
36	6,42	+0,18	+0,12	+0,44	+0,32	+0,26	0,27	—0,01	+34
37	7,54	+0,22	+0,17	+0,85	—0,44	+0,42	0,23	+0,19	—26
40	5,89	+0,67	+0,78	+0,37	+0,58	+0,60	0,30	+0,30	+2

поненты, но, как видно из рис. 1, они имеют вид случайных ошибок.

Подобная обработка пластинок контрольного поля не обнаружила какого-либо систематического смещения положения звезд. Смещения положений 27 звезд, которые надежно могли быть зафиксированы на пластинках контрольного поля, уже после первого сравнения представились в виде случайных ошибок.

Полученное значение для отклонения светового луча, проходившего около поверхности Солнца $2'',24$, превышает требуемое общей теорией относительности и находится в то же время, как доказывает Фрейндлих, в полном согласии с истинными результатами предыдущих наблюдений, опубликованных ранее. Совпадение этих последних с величиной, даваемой теорией относительности, является ошибочным и произошло вследствие неточностей, допущенных авторами при сравнении пластинок, случайно приведших как раз к уменьшению.

Из предыдущих наблюдений по обнаружению светового отклонения в поле тяготения Солнца наибольшего внимания заслуживает Ликкская экспедиция Кэмпбелла и Трюмплера 1922 г. в Австралию как давшая наиболее обстоятельный и обширный материал и результаты которой поразительным образом совпали с требуемыми теорией относительности.

Кэмпбеллом и Трюмплером не были произведены специальные снимки для определения разницы значений масштабов, поэтому эта разница вычислялась следующим образом. С возрастанием расстояния от Солнца световое отклонение быстро уменьшается, а смещение вследствие разницы масштабов, наоборот, растет, — поэтому для крайних звезд на пластинке, находящихся в среднем на расстоянии γ_0 , равном приблизительно десяти солнечным радиусам, предполагалось, что световое отклонение совершенно отсутствует, а все смещение их происходит вследствие разницы масштабов; из измерений этого смещения последняя и определялась.

Ясно, что подобным определением масштаба вводилась хоть и небольшая, но систематическая ошибка,

Когда были внесены необходимые поправки и, в частности, учтена еще поправка на изменение аппаратуры, происшедшее вследствие перевозки с Таити в Австралию (что делают сами Кэмпбелл и Трюмплер при помощи обработки снимков контрольного поля, но упоминают об этом лишь в послесловии), то для E получилось значение $2'',21$, хорошо совпадающее с последними результатами — $2'',24$.

При обработке наблюдений английской экспедиции 1919 г. вкралась тоже неточность, заключающаяся в том, что определение разницы значений масштабов производилось из сырых значений смещений звезд, не освобожденных от влияний рефракции и аберрации.

Ниже дается таблица результатов последней экспедиции и новой обработки прежних:

$E = 2'',2 \pm 0,10$; горизонт. камера 8,5 м. фок. расст. Потсд. эксп. 1929 г.

$E = 2'',2$; 15-футовая камера Ликкской экспедиции 1922 г.

$E = 2'',1$; 5-футовая камера Ликкской экспедиции 1922 г.

$E = 2'',0$ соотв. $2'',2$; 19-футовая камера Гринвичской экспедиции 1919 г.

Как видим, результаты всех наблюдений с полной определенностью говорят, что отклонение светового луча при прохождении около Солнца больше, чем даваемое общей теорией относительности в той математической форме, в которой теория развита Эйнштейном в 1916 г.

