

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА ЭЙНШТЕЙНА ВО ВРЕМЯ
СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ *)

А. А. Михайлов

Представим себе материальную частицу, которая движется со скоростью света в межзвёздном пространстве. С точки зрения ньютоновой механики такая частица при приближении к космической массе — звезде опишет гиперболическую орбиту с фокусом в центре звезды, очень мало отличающуюся от прямой. Эта орбита будет иметь лишь незначительное искривление — загиб в сторону звезды близ вершины гиперболы, совпадающей с периастроном — ближайшей к звезде точкой. Угол между асимптотами к гиперболе равен

$$2\alpha = 2f \frac{M}{c^2 R}, \quad (1)$$

где f — постоянная тяготения, M — масса звезды, c — скорость света, R — расстояние периастроном от центра звезды. Если звезда есть Солнце, поверхности которого касается траектория частицы, то M нужно положить равным массе, а R равным радиусу Солнца. После подстановки соответствующих величин в формулу (1) найдём, что $2\alpha = 0'',87$. Если бы луч света представлял собой поток подобных частиц, то на такой угол изменилось бы направление луча, идущего от звезды, находящейся далеко позади Солнца и видимой нами у самого края солнечного диска, вследствие чего звезда показалась бы отодвинутой на такой угол радиально прочь от Солнца. Свет от звезды, видимой на угловом расстоянии r от центра Солнца, отклонится на угол $\frac{0'',87}{r}$, если r выражать в единицах углового радиуса Солнца. Таким образом, все звёзды, в проекции на небесную сферу окружающие Солнце, показались бы раздвинутыми и смещёнными

*) Доклад, прочитанный на заседании Эйнштейновской сессии отделения физико-математических наук 30 ноября 1955 года.

со своих нормальных положений на углы $\frac{0'',87}{r}$ в направлениях прочь от Солнца.

В 1915 г. Эйнштейн показал, что общий принцип относительности требует в два раза большего смещения, так что коэффициент в предыдущей формуле должен быть увеличен до $1'',75$. Наблюдение этого «эффекта Эйнштейна» было возможно только во время полного солнечного затмения, когда близ закрытого Луною Солнца можно видеть и фотографировать звёзды. Попытка обнаружить отклонение света во время затмения 1918 г., предпринятая экспедицией Ликской обсерватории, не удалась. Хорошие шансы обещало затмение 29 мая 1919 г., так как Солнце проектировалось в это время на богатую яркими звёздами область в созвездии Тельца.

Важность иметь вокруг Солнца достаточное число ярких звёзд объясняется следующими соображениями. Прежде всего отметим, что наблюдения можно производить только фотографически с помощью длиннофокусной камеры-астрографа. Для примера допустим, что фокусное расстояние объектива равно 6 м. Тогда $1'',75$ соответствуют на пластинке линейной длине в 0,051 мм. Таково было бы смещение звезды, находящейся на самом краю Солнца. Однако такую звезду нельзя наблюдать, так как её свет потонет в ярких частях внутренней короны Солнца. В лучшем случае можно сфотографировать звезду достаточной яркости, например 7—8 величины, на расстоянии солнечного радиуса от края Солнца, при $r=2$. Если такая звезда будет сфотографирована, то это ещё ничего не даст, так как не будет известно её нормальное, несмещённое положение, поскольку фотография не даёт абсолютных координат звёзд, а только относительные. Поэтому необходимо, чтобы на фотографии запечатлелось несколько звёзд, в идеальном случае расположенных симметрично относительно центра Солнца. Если бы, скажем, была вторая звезда с таким же значением r , но по другую сторону Солнца, то расстояние между обеими звёздами оказалось бы увеличенным на удвоенный эффект Эйнштейна, в нашем примере на 50 μ . Однако для того, чтобы измерить это увеличение, нужно знать, чему равняется это расстояние при нормальном положении звёзд. Рассчитать его на основании каталожных положений звёзд нельзя, во-первых, вследствие недостаточной точности каталогов, содержащих ошибки в несколько десятых долей секунды дуги, а во-вторых, вследствие незнания точного масштаба снимка, зависящего от фокусировки и температуры. Насколько точно нужно знать масштаб снимка, видно из следующего рассуждения. Две звезды, расположенные симметрично к Солнцу на расстоянии $2r$ от его центра, отстоят друг от друга на $4r$ или, приблизительно, на $4000''$. Чтобы гарантировать $0'',05$ в этом расстоянии, нужно знать масштаб с относительной точностью до $1/80000$, что соответствует 0,075 мм в положении пластинки относительно объектива. Таким образом,

изменение фокусировки или фокусного расстояния на 0,1 мм уже вызовет заметную ошибку масштаба. Для звёзд, находящихся дальше от Солнца, для которых смещение меньше, а расстояние больше, требуется ещё более точное знание масштаба.

Для преодоления этих трудностей приходится вторично фотографировать ту же область неба при той же установке инструмента в то время, когда Солнце находится далеко от этой области. Такая фотография, дающая нормальные, несмещённые положения звёзд, должна быть сделана при ночном небе, лучше всего через полгода после или до затмения, при диаметрально противоположном положении Солнца. Влияние собственных движений звёзд за такой промежуток времени, как правило, незначительно и может быть учтено с помощью каталогов. Однако состояние инструмента при контрольном фотографировании будет вообще иным, что вызовет некоторое изменение масштаба, которое необходимо принять во внимание.

Пусть измерением двух пластинок, одной — снятой во время затмения (будем называть её затменной фотографией) и другой — снятой ночью (назовём её контрольной фотографией), установлено, что некоторая звезда, находящаяся на расстоянии r от центра Солнца, смещена на затменном снимке прочь от центра Солнца на угловую величину δr . Если бы имел место эффект Эйнштейна, то это можно было бы представить как

$$\delta r = \frac{A}{r},$$

где A — по теории относительности равняется $1'',75$, если r выражено в единицах видимого радиуса Солнца. Но изменение масштаба вызовет дополнительный член, пропорциональный расстоянию, и поэтому измеренное смещение должно быть представлено таким условным уравнением:

$$\delta r = \frac{A}{r} + Br, \quad (2)$$

где B — коэффициент поправки за масштаб.

Для уверенного определения двух неизвестных A и B из таких условных уравнений нужно иметь достаточное число звёзд с возможно сильно разнящимися значениями r . Но мы уже упомянули, что звёзд с $r < 2$ почти нельзя наблюдать, поэтому нужно наряду со звёздами с такими наименьшими значениями r иметь и звёзды с возможно большими значениями r , не меньшими 5 или 6 радиусов Солнца. Отсюда следует необходимость применять сравнительно широкоугольные астрографы с полем не меньше $3 \times 3^\circ$. Тогда далёкие звёзды послужат главным образом для определения масштаба, т. е. коэффициента B , а близкие к Солнцу звёзды дадут величину эйнштейновского смещения, т. е. постоянную A .

Конечно, при выводе δr нужно учесть влияние всех факторов, искажающих положение звёзд на пластинке. К ним относятся диф-

ференциальная рефракция и дифференциальная абберация. Их можно учесть обычным способом, принятым при обработке астрофотографий при измерении прямоугольных координат звёзд, например, так называемым методом шести постоянных, однако выгоднее дифференциальный метод измерения, учитывая рефракцию и абберацию по полным формулам. На δr может повлиять ещё неперпендикулярность пластинки к оптической оси объектива. Это влияние нужно устранить тщательной конструкцией кассетной части инструмента и хорошей выверкой его, в противном случае необходимо учитывать при обработке квадратичные члены.

Дифференциальный метод измерения требует особого порядка производства контрольных фотографий, которые снимаются «сквозь стекло», т. е. фотопластинка с тщательно вычищенной обратной стороной вставляется в кассету обратной стороной, эмульсией от объектива, конечно, изменив фокусировку в зависимости от толщины стекла пластинки. При измерении пластинка затмения складывается с контрольной пластинкой слой к слою так, чтобы расстояние между изображениями каждой звезды на обеих пластинках не превышало 1 мм. Во избежание возможного сдвига одной пластинки относительно другой в процессе измерения пластинки склеиваются по углам или обклеиваются липкой лентой по краям. С помощью окулярного микрометра измерительного микроскопа измеряются разности Δx и Δy прямоугольных координат между изображениями каждой звезды. Эти разности зависят от того, как обе пластинки сложены: от того, насколько расходятся между собой оптические центры обеих пластинок и от перекоса одной пластинки по отношению к другой. Кроме того, в этих разностях присутствует и эйнштейновское смещение. Цель обработки заключается именно в выявлении последнего и в устранении первых двух влияний. Это достигается, полагая

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= a + bx + cy, \\ \Delta y &= a' + b'x + c'y, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где x, y — прямоугольные координаты каждой звезды, выраженные в делениях шкалы измерительной машины, обычно в миллиметрах, a, b, c, a', b', c' — неизвестные постоянные, подлежащие определению из условных уравнений (3). Эйнштейновское смещение не участвует в этих формулах, поскольку закон его действия иной, и поэтому оно сохраняется в остаточных членах после того, как уравнения (3), написанные для всех измеренных звёзд, будут решены по способу наименьших квадратов.

Пусть эти остаточные члены будут соответственно δx и δy . Тогда для получения эйнштейновского смещения δr нужно эти разности спроектировать на направление, проходящее через центр Солнца, откуда

$$\delta r = \delta x \sin P + \delta y \cos P,$$

где P — угол положения звезды относительно центра Солнца, обычно считаемый от положительного направления оси y (на север) к положительному направлению оси x (на восток).

Полученные таким способом δr служат для нахождения A из условных уравнений (2).

Первое наблюдение эффекта Эйнштейна было произведено двумя английскими экспедициями во время затмения 29 мая 1919 г. Полоса полного затмения проходила через Бразилию, Атлантический океан и Центральную Африку. Одна экспедиция находилась на острове Принсипе у берегов Африки, другая на севере Бразилии в местечке Собраль. Экспедиции были снабжены несколькими астрографическими трубами с фокусными расстояниями от 3,4 до 5,8 м, лежащими горизонтально и неподвижно; лучи направлялись в трубы после отражения от зеркал целостатов. Здесь нужно упомянуть, что в течение экспозиции, которая длится несколько десятков секунд изображения звёзд должны оставаться на пластинке строго неподвижными. Но вследствие суточного вращения небесной сферы изображения перемещаются при фокусном расстоянии объектива в 6 м со скоростью около 25 мм в минуту. Поэтому либо труба астрографа должна с большой точностью двигаться вслед за звёздами, что требует параллактической установки, либо при неподвижном положении трубы перед объективом астрографа должен находиться целостат, зеркало которого поворачивается так, чтобы отражённые от него лучи шли в астрограф, сохраняя неизменное направление. И в том и в другом случае к точности движения соответствующего инструмента предъявляются высокие требования, поскольку положения звёзд на фотографии измеряются с точностью до микрона.

Африканская экспедиция 1919 г. имела лишь частичную удачу, так как часть снимков была испорчена облаками. На двух фотографиях удалось измерить по 5 звёзд. Контрольные снимки были сделаны в Англии перед отправкой экспедиции, что, конечно, предосудительно, поскольку инструмент в промежутке демонтировался и его состояние могло измениться. Тем не менее полученное смещение, т. е. коэффициент A в формуле (2) оказался равным $1'',65$, достаточно близко к теоретическому значению, даваемому принципом относительности.

Наблюдения другой экспедиции в Собрале были удачнее. На фотографиях вышло по семь звёзд, из них две были на расстоянии двух солнечных радиусов от центра Солнца. Снимки, полученные с длиннофокусным астрографом, были вполне резкими. Контрольные снимки были сделаны, не демонтируя инструмента, через два месяца после затмения. Коэффициент смещения оказался равным $1'',98$, однако остаточные члены после решения уравнений (2) имели систе-

матический характер, что было приписано цилиндрической деформации целостатного зеркала под влиянием нагревания Солнцем. Повторное вычисление измерений с учётом членов второго порядка дало почти тот же результат. Однако, по нашему мнению, опубликованные наблюдаемые отклонения для отдельных звёзд лучше всего представляются коэффициентом $A = 2'',07$. Как бы то ни было, наблюдениями установлено существование смещения, довольно близкого по величине к предсказанному на основании теории относительности и во всяком случае гораздо большее, чем требовала корпускулярная теория света. Однако нельзя было считать, что вопрос об эйнштейновском смещении не нуждался в дальнейшем исследовании. Наблюдения 1919 г. нужно считать лишь удачной разведкой, испытанием метода наблюдений и обработки. Главным недостатком этих наблюдений было малое число звёзд и сильно несимметричное распределение их вокруг Солнца. Слабым местом оказался целостат, зеркало которого подвержено термическим деформациям. Выяснилась также важность хорошего определения масштаба фотографий затмения.

Значительно более уверенные результаты были получены американской экспедицией в Австралии во время затмения 21 сентября 1922 г. Двойной астрограф на параллактической монтировке, следовательно без целостата, имел фокусное расстояние в 4,6 м и покрывал большое поле — пластинки имели размер 43×43 см. Было получено четыре удачных снимка, на которых накануне вечером было снято другое звёздное поле на 90° от Солнца для сравнения и получения масштаба. За полгода до затмения на острове Таити тем же инструментом были сделаны контрольные снимки поля затмения вместе с тем же полем сравнения. Вышли изображения 118 звёзд, ближайшая из них была на расстоянии двух радиусов от центра Солнца. Авторы — Кэмбелл и Тремплер — считают наиболее вероятным результатом своего исследования $A = 1'',72$, хотя привлечение области сравнения для определения масштаба увеличивало это значение A до $2'',05$.

Обработка и результат этого определения подверглись критике со стороны нескольких специалистов. Главный недостаток этого исследования отклонения света, как, впрочем, и всех других, заключается в том, что заранее принимается закон отклонения, выражаемый формулой A/r , т. е. отклонение при приближении к Солнцу нарастает по гиперболической кривой, обратно пропорционально расстоянию до центра Солнца. Этот закон даётся теорией, правильность которой должны проверить наблюдения. Вместо этого наблюдения дают лишь величину постоянной A в предположении правильности самого закона. Причина этого заключается в малости отклонения, которое для отдельных звёзд меньше ошибки, с которой измеряется положение данной звезды. Разброс результатов для отдельных звёзд слишком велик для того, чтобы

можно было вывести не только значение постоянной A , но и проверить закон зависимости смещения от расстояния до центра Солнца. Для демонстрации этого обстоятельства обратимся к рис. 1, заимствованному из статьи директора Парижской обсерватории Эсклангона в журнале *l'Astronomie* за 1924 г. и показывающему смещения отдельных звёзд, полученные из наблюдения затмения 21 сентября 1922 г. На рисунке по оси абсцисс отложены угловые расстояния звёзд от центра Солнца в градусах. По оси ординат

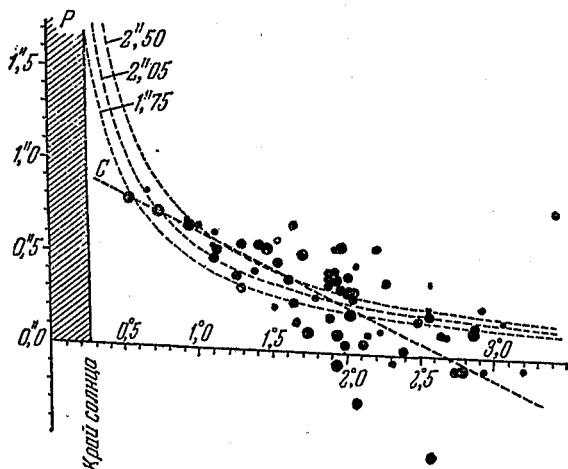


Рис. 1.

нанесены в другом масштабе. наблюденные смещения. Чёрные точки, изображающие смещения звёзд, имеют разные диаметры в зависимости от статистического веса измерения положения данной звезды. Координатные оси не перпендикулярны между собой, чем учитывается небольшая поправка за масштаб. Заштрихованная полоса изображает солнечный диск. Три точечные пунктирные линии дают смещение для трёх значений постоянной A , именно $1'',75$, $2'',05$ и $2'',50$. Из рассмотрения чертежа трудно сказать, какая из этих трёх линий ближе соответствует наблюдению. Лишь две или три ближайшие к Солнцу звезды лучше укладываются близ линий $A = 1'',75$ и $2'',05$, остальные звёзды не дают возможности решить, какое же значение A наилучшее. Лишь применение метода наименьших квадратов указывает на некоторое преимущество значения $A = 1'',72$, но небольшое изменение масштаба, т. е. угла между осями координат, заметно изменит это наилучшее значение. Если говорить об определении закона смещения из этих наблюдений, то проведённая на глаз штриховая прямая, уравнение которой

$$\delta r = -0'',1r + 1'',0,$$

едва ли не лучше представляет наблюдаемое смещение. Но, конечно, ввиду большого разброса точек, о реальности такого закона смещения говорить не приходится. Но эта формула показывает, насколько важно независимое определение масштаба; изменением масштаба, правда на недопустимо большую величину, можно все отклонения свести к постоянной величине, так как влияние масштаба как раз даёт член, пропорциональный расстоянию r .

Отсюда понятны дальнейшие попытки наблюдения эффекта Эйнштейна более рафинированным способом, обращая особое внимание на получение масштаба снимков независимым образом, не из условных уравнений вида (2), а извне, например впечатыванием на снимки затмения некоторого стандартного угла. Однако для чистоты дела такое впечатывание должно совершаться при том же состоянии инструмента, как при затмении, лучше всего во время фотографирования самого затмения.

Такая попытка, тщательно подготовленная, была сделана экспедицией Потсдамской астрофизической обсерватории, возглавляемой проф. Фрейндлихом, во время затмения 9 мая 1929 г. на севере Суматры. Главный инструмент состоял из двух одинаковых труб с фокусным расстоянием 8,5 м, расположенных горизонтально под углом в 25° друг к другу. Их объективы были направлены на общее зеркало целостата. Одна труба смотрела на отражение Солнца, другая — на поле сравнения в стороне от него. Предполагалось, что, находясь в одинаковых условиях, масштабы снимков, покрывающих $3 \times 3^\circ$, будут изменяться одинаково. Через несколько месяцев после затмения были сделаны контрольные снимки как поля затмения, так и области сравнения. Кроме того, для определения масштаба на снимки впечатывалась с помощью коллиматора прямоугольная сетка-шкала. Обработка снимков дала $A = 2'',2$.

Другой инструмент был широкоугольный астрограф с фокусным расстоянием 3,4 м и полем $7,5 \times 7,5^\circ$, смонтированный параллактически. Для определения масштаба труба переводилась ещё во время полной фазы затмения на другую удалённую от Солнца область, которая снималась на ту же пластинку. Эти снимки дали неудовлетворительный результат.

Детальная дискуссия результатов, полученных главным инструментом, в которой участвовали специалисты по уравнительным вычислениям и приложениям способа наименьших квадратов из Потсдамского геодезического института, со всей определённостью показала, что для уверенного определения масштаба и получения не только постоянной A , но и закона отклонения света, необходимо очень точное и независимое определение масштаба снимков затмения и что испробованные до того времени способы этого неудовлетворительны.

Затмение 19 июня 1936 г. представляло исключительный интерес для советских астрономов. Полоса полной фазы проходила

через весь Советский Союз от Чёрного моря до Дальнего Востока. Продолжительность полного затмения была небольшая — около $2\frac{1}{4}$ минут, но время года и значительная высота Солнца благоприятствовали наблюдениям. Изучение эффекта Эйнштейна входило в программу работ экспедиции Государственного астрономического института им. Штернберга, возглавлявшейся А. А. Михайловым.

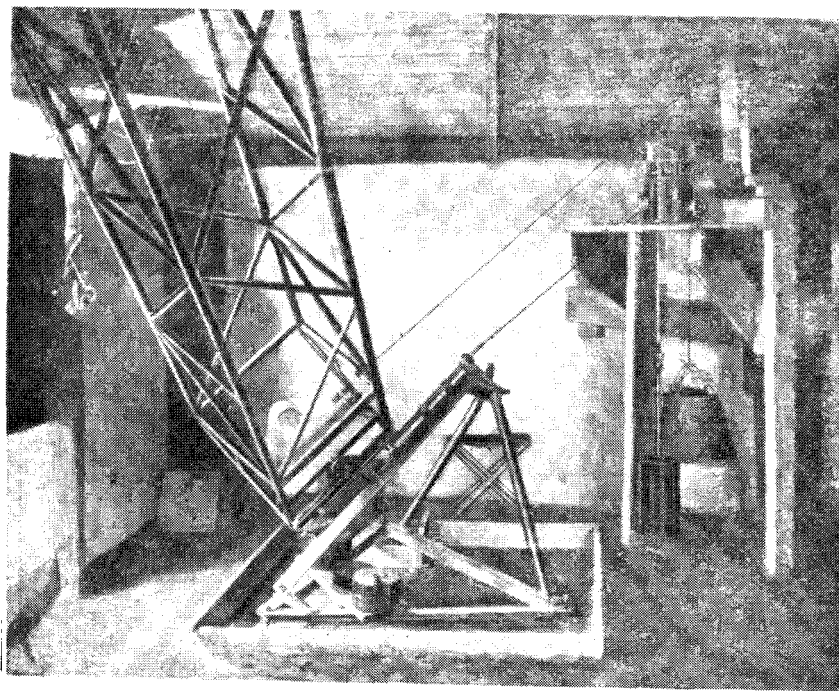


Рис. 2. Нижняя часть инструмента для наблюдения эффекта Эйнштейна во время затмения 1954 г. Справа вверху виден часовой механизм.

Для фотографирования был использован двухлинзовый объектив диаметром в 15 см и фокусным расстоянием в 6 м, специально изготовленный в Государственном оптическом институте под руководством Д. Д. МаксUTOва. Пластины размером 35×35 см покрывали область в $3\frac{1}{3} \times 3\frac{1}{3}$ градуса. Они были изготовлены по специальному заказу на шлифованном зеркальном стекле толщиной в 6 мм и весили почти 1,5 кг каждая. Изготовление кассет такого размера, обеспечивающих точность фокусировки до 0,05 мм и допускающих быструю смену для того, чтобы успеть в течение полной фазы сделать несколько снимков, было практически неосуществимо. Это затруднение было обойдено тем, что пластины без

всякой кассеты прямо накладывались на закруглённые концы трёх винтов, служивших также для центрировки пластинки и тонкой фокусировки. Но для этого самый павильон был светонепроницаемым и представлял собой фотографическую камеру, внутри которой находился наблюдатель со своим помощником. Наблюдатель

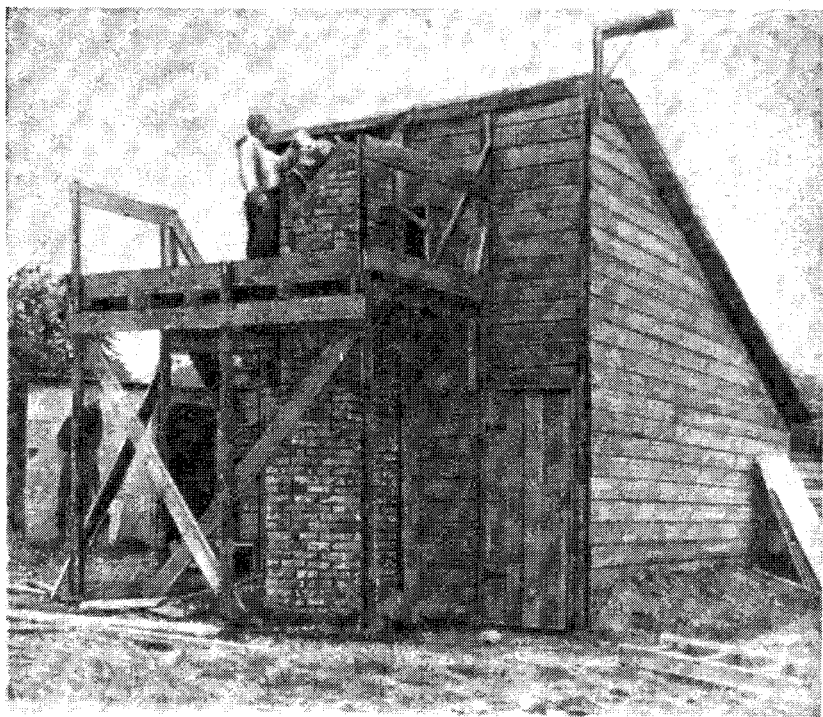


Рис. 3. Внешний вид павильона для наблюдения эффекта Эйнштейна во время затмения 1954 г. в Пятигорске.

накладывал пластинку на винты и оперировал затвором, помощник убирал пластинку по окончании экспозиции. Таким путём удалось производить смену пластинок в течение четырёх секунд, а за всю продолжительность полной фазы снять четыре пластинки с выдержками в 25 и 35 секунд. Объектив был соединён с рамой, в которую были ввёрнуты упомянутые винты, прочной фермой, сваренной из железных труб. Верхняя часть фермы с объективом слегка высывалась из павильона и была подвешена на кардановом подвесе, позволявшем ей поворачиваться в любом направлении. Нижняя часть фермы опиралась ползунками на стальной цилиндр, по которому она могла скользить, увлекаясь длинным винтом, вращавшимся ча-

совым механизмом с нужной скоростью для парализации суточного вращения небесной сферы. Большая часть веса фермы снималась противовесами. Ведущий цилиндр выверялся параллельно касательной к суточной параллели Солнца в средний момент полного затмения.

Для независимого определения масштаба предполагалось применить следующий метод. Перед объективом, под углом около 45° к оптической оси, была укреплена плоско-параллельная стеклянная пластинка большой точности, также изготовленная Д. Д. Максutowым. Две её плоскости отражали в общей сложности около 9% света, идущего от области неба, находящейся почти на 90° от Солнца, так что расположенные в этой области звёзды фотографировались одновременно со звёздами в области затмения, но ослабленными на $2^{1/2}$ звёздных величины. В качестве области сравнения было выбрано звёздное скопление в созвездии Волос Вероники, где на площади, покрываемой фотопластинкой, имеется около десятка звёзд 5—6 величины. Ослабленные отражением от стекла, они должны были выйти на снимке 7—9 величины, такой же, как и большинство звёзд затменного поля, и служили бы для определения масштаба снимков. Преимущество этого способа заключается в том, что поле сравнения фотографируется одновременно с полем затмения при одном и том же состоянии инструмента и с одной и той же выдержкой. Контрольные фотографии тех же областей, снятые в ночных условиях, дали бы звёзды поля затмения в их нормальных, несмещённых положениях, а звёзды поля сравнения позволили бы очень точно привязать снимки затмения к контрольным снимкам, т. е. позволили бы уверенно учесть разности масштаба, а также рефракции.

Место наблюдений — Куйбышевка Восточная, недалеко от Благовещенска, было выбрано с таким расчётом, чтобы область сравнения — группа звёзд Волос Вероники, находилась во время затмения почти на такой же высоте над горизонтом, как и Солнце, что было выгодно для учёта рефракции. Во время затмения были получены две фотографии, годные для измерения. Инструмент был оставлен на месте и в марте 1937 г. были сделаны контрольные снимки точно в тех же часовых углах. К сожалению, вследствие недостаточной выверки инструмента, звёзды поля сравнения нельзя было использовать при обработке, которую пришлось вести обычным способом, определяя масштаб из условных уравнений вида (2). Неблагоприятным обстоятельством было ещё то, что температурные условия во время фотографирования затмения сильно отличались от условий при производстве контрольных снимков — в первом случае температура была $+23^\circ$, а во втором — 21° . Было измерено и использовано при обработке 29 звёзд, из них для ближайшей было $r=1,97$ радиуса Солнца. Постоянная A получена равной $2'',74 \pm 0'',31$ (вероятная ошибка) или в полтора раза больше теоретического значения. Подробное рассмотрение результата показы-

вает, что это значение A основывается главным образом на измеренном смещении трёх ближайших к Солнцу звёзд и поэтому не может считаться особенно надёжным. Но реальность смещения, хотя бы и меньшей величины, доказывается следующим. Сумма квадратов измеренных разностей в положениях звёзд, взятых в направлении от центра Солнца, т. е. сумма квадратов Δr , оказалась равной 29 квадратных секунд, если же освободить эти разности от смещения, то эта сумма уменьшается до 15". Если взять для сравнения сумму квадратов измеренных разностей координат звёзд в направлении, перпендикулярном к радиусам Солнца, в котором эйнштейновское смещение не участвует, то эта сумма оказалась равной 17", т. е. практически совпадающей с суммой квадратов радиальных смещений, освобождённых от эффекта смещения.

Отметим теперь, в чём заключался дефект выверки движения инструмента, не позволивший в нашем случае использовать для определения масштаба область звёзд сравнения. Обычно эта выверка инструмента производится так, чтобы изображение того звёздного поля, в данном случае околосолнечного, на которое направлен инструмент, оставалось неподвижным на фотопластинке в течение всей экспозиции. Но для получения хороших изображений поля сравнения, находящегося на расстоянии около 90° от Солнца, требуется ещё дополнительная выверка по этому последнему полю, так как хорошее движение инструмента за звёздами первого поля ещё не обеспечивает столь же хорошего движения за звёздами поля сравнения. Поясним это обстоятельство.

Пусть имеется некоторая неточность в установке инструмента, состоящая в том, что ось вращения его не строго параллельна оси вращения Земли. При хорошей выверке движения вслед за воображаемой звездой, находящейся в центре поля затмения, эта звезда будет оставаться неподвижной на фотопластинке, но вся область неба будет медленно вращаться вокруг этого центра. В течение экспозиции порядка одной минуты такое вращение останется ещё совсем незаметным, поскольку самые далёкие звёзды этой области отстоят от центра не дальше 2° . Но звезда в области сравнения, отстоящая на 90° , будет иметь радиус вращения в 30 раз больший и при той же угловой скорости вращения опишет на пластинке продолговатый след, негодный для точного измерения, или даже не запечатлется вовсе.

С тех пор мы неоднократно пытались наблюдать эффект Эйнштейна по нашему методу с несколько усовершенствованной аппаратурой во время ряда последующих затмений. Наблюдения затмения 21 сентября 1941 г. были организованы в окрестностях Алма-Аты. Погода в день затмения была безоблачной. Однако по условиям военного времени пришлось вывезти из Москвы не вполне готовый инструмент и налаживать переделанный и незаконченный часовой механизм уже на месте, при отсутствии хорошей мастерской.

В результате часовой механизм не удалось правильно отрегулировать, и звёзды вышли не точками, а чёрточками, которые нельзя было измерять. Затмение 9 июля 1945 г. мы собирались наблюдать в Рыбинске, где всё было подготовлено для этого, однако во время затмения была сплошная облачность. Особенно благоприятным представлялось затмение 20 мая 1947 г., для наблюдения которого была направлена советская экспедиция в Бразилию. В месте наблюдения — местечке Арашá штата Бело-Оризонте, продолжительность полной фазы была почти четыре минуты и май месяц по ясности был одним из лучших в году. К сожалению вечером накануне затмения из Аргентины надвинулся циклон и сплошная облачность не позволила провести наблюдения. Не лучше обстояло дело и 30 июня 1954 г., когда мы собирались наблюдать затмение в Пятигорске. К этому затмению наш инструмент был несколько переделан: вместо прежнего был поставлен новый объектив с отверстием в 20 см и тем же фокусным расстоянием в 6 м. Наклонная плоско-параллельная стеклянная пластинка перед объективом была заменена небольшим, имеющим в проекции круг с диаметром в 8 см эллиптическим диагональным зеркалом из плавленного кварца, что было сделано для того, чтобы исключить возможность температурных деформаций отражающей плоскости. То обстоятельство, что при этом поле затмения фотографировалось лучами, проходящими через край объектива, а поле сравнения — через его среднюю часть, не имело значения, так как контрольные фотографии должны были сниматься при тех же условиях. Наконец, было сделано по проекту В. П. Линника особое приспособление для впечатывания через тот же объектив нескольких систем интерференционных полос со строго постоянным угловым расстоянием между ними. Мы готовились ещё к наблюдению затмения 20 июня 1955 г. очень большой продолжительности на Цейлоне, но цейлонские власти не дали разрешения на въезд советской экспедиции. Впрочем, об этом жалеть не приходится, так как почти все бывшие там иностранные экспедиции потерпели неудачу из-за плохой погоды.

Эффект Эйнштейна наблюдался ещё дважды американским астрономом ван Бисбруком. По его словам независимо от нас, он разработал и применил тот же метод для определения масштаба. У него тоже перед объективом помещалась плоско-параллельная пластинка, но не прозрачная, как у нас, а слабо алюминированная, так что она около 50% света пропускала и приблизительно столько же отражала. Недостатком этого было то, что поле затмения сильно ослаблялось, что заставляло по крайней мере удваивать продолжительность экспозиции каждого снимка и тем уменьшать число фотографий, которые можно было снять в течение полной фазы затмения. Выигрыш в яркости поля сравнения при этом не имеет существенного значения, так как это поле всегда можно выбрать

с достаточно яркими звёздами. В качестве объектива применялся специально сконструированный триплет с отверстием в 15 см и фокусным расстоянием в 6,1 м. Труба инструмента была монтирована на упрощённой параллактической установке. Пластины размером 43×43 см покрывали площадь 4×4 градуса.

Затмение 20 мая 1947 г. ван Бисбрук также наблюдал в Бразилии, в местечке Бокаюва, находящемся почти на 500 км к северо-востоку от Арашá, и циклон, помешавший нашим наблюдениям, ещё не успел дойти в день затмения до Бокаювы. Им был сделан всего один снимок с огромной выдержкой в 3 минуты 5 секунд, в результате чего пластинка оказалась очень сильно завуалированной. Изображения звёзд поля сравнения были искажены сильным астигматизмом, что наблюдатель приписал деформации плоско-параллельной пластинки от нагревания Солнцем, но мы склонны считать, что это искажение изображений, по крайней мере частично, обусловлено недостаточной выверкой движения инструмента, тем более, что при столь длинной выдержке предъявлялись особенно высокие требования к точности ведения. Как бы то ни было, полем сравнения не удалось воспользоваться при обработке снимка, и определение масштаба пришлось произвести обычным способом, с помощью условных уравнений (2). Контрольные снимки были сделаны в том же месте в августе 1947 г. Всего была измерена 51 звезда, из них ближайшая к Солнцу находилась на расстоянии 3,33 радиуса Солнца, так что максимальное эйнштейновское смещение, которое можно было измерить, составляло всего лишь $0''{,}53$, что соответствовало в линейной мере на фотографии 15 μ . Измерения производились не дифференциальным способом два раза. В результате было получено смещение $A = 2''{,}01 \pm 0''{,}27$ (средняя ошибка). Как отмечает сам автор, это значение почти целиком основывается на пяти звёздах, расстояние которых от центра Солнца находится в пределах 3,3 до 3,8 солнечных радиусов.

Удачнее было наблюдение ван Бисбруком затмения 25 февраля 1952 г. в Хартуме (Судан). Был использован тот же инструмент, но с жёлтым светофильтром перед объективом. Получены две фотографии затмения с выдержками в 60 и 90 секунд, и две контрольные фотографии, снятые через полгода. На этот раз удалось определить масштаб по звёздам поля сравнения. Автор приводит такое окончательное значение полученного смещения $A = 1''{,}70 \pm 0''{,}10$ (средняя ошибка). Измерено всего лишь 9 звёзд на одной пластинке и 11 звёзд на другой. Из них только одна звезда находилась на расстоянии 2,12 r от центра Солнца, а две следующие по близости звезды были на расстояниях 4,34 r и 4,37 r . Поэтому результат в значительной степени держится на этих немногих звёздах. Остаточные члены условных уравнений обнаруживают заметную систематичность, которая исчезает, если выразить наблюденное

отклонение линейной формулой

$$\delta r = -0'',066r + 0'',67,$$

довольно близкой к той, которую мы вывели для затмения 1922 г. Наблюдённые отклонения для отдельных звёзд вместе с кривой смещения и прямой изображены на рис. 4.

Насколько лучше линейная формула представляет наблюдения затмения 1952 г., видно из того, что она даёт сумму квадратов остаточных членов в микронах равной 140, тогда как формула $A = 1'',70/r$ даёт в сумме 272, т. е. в два раза больше. Конечно, линейная формула является лишь интерполяционной и при больших значениях r теряет смысл, но она показывает, насколько резуль-

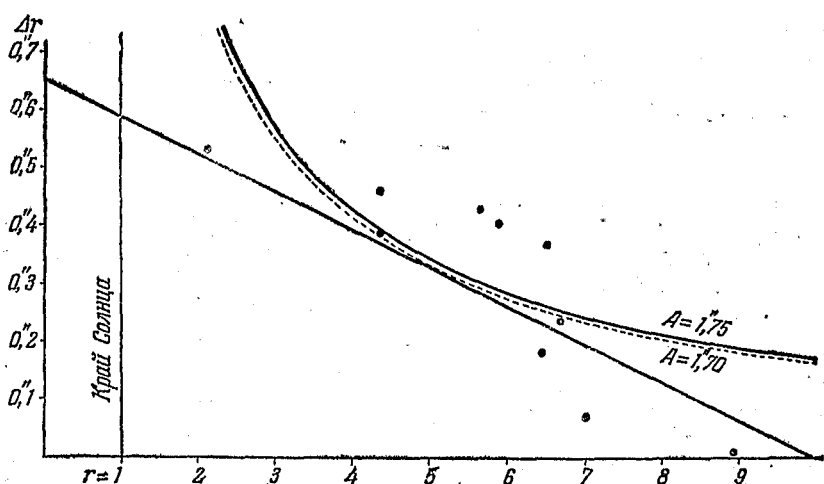


Рис. 4. Отклонение видимых положений звёзд по наблюдениям ван Бисрука во время затмения 25 февраля 1952 г.

таты наблюдений ещё далеки от подтверждения закона смещения, обратно пропорционального расстоянию до центра Солнца.

В связи с этим в 1924 г. Эсклангон писал: «наблюдения не подтверждают и не опровергают закон отклонения Эйнштейна. Они лишь указывают, если отбросить всякие предположения о систематических ошибках, на существование отклонений около Солнца, но без определения закона и без точной величины отклонения у солнечного края». Эти слова, быть может в смягчённой форме, остаются справедливыми и поныне, несмотря на ряд наблюдений, произведённых в последующие годы. Остаётся ещё и поныне трудная, но интересная задача более полного и точного экспериментального исследования эффекта Эйнштейна. На основании выполненных работ довольно ясно, какой для этого требуется инстру-

ментарий и какой нужно применять метод наблюдения. Но учитывая большую зависимость наблюдений от погоды, нужно, чтобы этими исследованиями занимались более систематически и большее число учёных, не пропуская ни одного благоприятного затмения.

Остаётся вопрос, нет ли других возможностей проверить отклонение лучей света под влиянием гравитирующих масс, кроме наблюдения солнечных затмений. Может быть удастся, применяя инфракрасную технику и инструмент вроде внезатменного коронографа, произвести наблюдения звёзд вблизи Солнца и без затмения, но для разработки этого метода потребуется большая предварительная работа. Что же касается использования других отклоняющих масс, кроме Солнца, то, ограничиваясь областью астрономии, такая возможность почти исключена. Действительно, формула (1), справедливая и для закона Эйнштейна при удвоении числового коэффициента, показывает, что отклонение луча пропорционально потенциалу тяготения

$$\frac{fM}{R}$$

на поверхности сферической массы. После Солнца наибольшим потенциалом тяготения обладает планета Юпитер. Однако потенциал на его поверхности в 106 раз меньше потенциала на поверхности Солнца. Кроме того, вероятность наблюдения звезды достаточно близко к краю Юпитера очень мала вследствие малых видимых размеров планеты. Таким образом наблюдение эффекта Эйнштейна у края Юпитера практически невозможно. Лишь некоторые шансы может дать интерферометрическое измерение двойной звезды близ самого края Юпитера, как на то указал недавно В. П. Линник. Остаётся ещё возможность заметить отклонение лучей далёкой звезды, проектирующейся на небесную сферу в самой близости от другой, более близкой к нам звезды, на что недавно обратил внимание Г. А. Тихов. Но этот интересный вопрос в значительной мере относится ещё к области фантазии. Таким образом пока мы ограничены в исследовании этого явления наблюдением солнечных затмений, но это не значит, что не нужно работать над осуществлением и других более трудных возможностей.