

20. Современная программа наблюдений

Большинство лабораторных исследований, проводимых в настоящее время в области общей теории относительности, направлено на подтверждение (или опровержение) теории Эйнштейна. Так как теория утверждает полное равенство инертной и гравитационной масс, очень существенно, что в последнее время Дикке существенно улучшил доказательство этого равенства и тем самым убедился, это основное положение общей теории относительности подтверждается с точностью до 10^{-11} . Другие выводы теории также подвергались проверке; эти выводы получили подтверждение с различной степенью надежности.

Мы уже говорили о том, что спектральные линии, возникающие вблизи большой массы, сдвигаются в красную сторону (т. е. в направлении длинных волн) спектра. Это так называемое красное гравитационное смещение было впервые найдено в спектре белого карлика, Сириуса В, звезды, образованной из вещества очень высокой плотности; на поверхности этой звезды гравитационное поле значительно сильнее, чем на поверхности любого небесного тела, входящего в солнечную систему, в том числе и на поверхности самого Солнца. Однако радиус Сириуса определяется довольно приблизительно и проверка теоретического предсказания может быть осуществлена лишь очень грубо. Гравитационное красное смещение в спектре Солнца составляет всего лишь одну тридцатую от гравитационного красного смещения Сириуса В; вместе с тем смещение и расширение спектральных линий на Солнце происходит также и по другим причинам. Некоторое время различие между красным смещением спектральных линий в центре солнечного диска и на его краях рассматривалось как серьезное противоречие выводам общей теории относительности.

Сейчас считают, что это различие обусловлено (по всей вероятности) конвективными токами, имеющими место в видимых слоях Солнца; продолжающиеся наблюдения ставят своей целью не столько проверку общей теории относительности, сколько лучшее понимание строения и динамики Солнца. Лабораторные эксперименты Паунда обнаружили согласие предсказанного и измеренного красного смещения в пределах экспериментальных ошибок с

точностью до одного процента; таким образом, гравитационное красное смещение следует считать обоснованным с вполне удовлетворительной точностью.

Л. Шифф (Стенфордский университет) и некоторые другие подчеркивали, что гравитационное красное смещение согласуется не только с общей теорией относительности, но и с любой другой теорией, в которой уменьшение потенциальной энергии света, идущего в сторону, противоположную направлению гравитационного поля, приводит к соответствующему изменению частоты. Пропорциональность частоты и энергии света составляют одно из основных утверждений квантовой теории, выдвинутых в оригинальной работе немецкого физика Макса Планка (1858—1947); эта работа появилась в 1900 г. В ответ Шиффу заметим следующее: вполне может случиться, что многие приемлемые теории тяготения приводят к гравитационному красному смещению, но можно построить также и такие теории тяготения, в которых гравитационного красного смещения не будет; если иметь это в виду, экспериментальное подтверждение существования красного смещения вовсе не лишено интереса.

Искривление солнечных лучей, проходящих вблизи тел с большой массой, наблюдается во время полных солнечных затмений.

Наблюдения, которые по необходимости проводятся в нестационарных условиях, могут осуществляться лишь в сравнительно редкие годы; длительность полных солнечных затмений исчисляется минутами. Все это приводит к тому, что такие наблюдения уже нельзя улучшить или повторить, как это можно сделать с обычными астрономическими наблюдателями; точность полученных результатов всегда оставляет желать лучшего. По этой причине несколько групп экспериментаторов, среди них Г. Хилл (университет в Весли), ищут возможность такой постановки опыта, которая позволила бы производить наблюдения при дневном освещении. Короче говоря, речь идет о том, чтобы сканировать непосредственную окрестность Солнца с помощью техники, сходной с той, которая используется при создании телевизионного изображения; нужно выделить звезды, близкие к краю Солнца, по незначительному увеличению яркости неба, столь незначительному, что оно остается незаметным для невооруженного глаза. Если такая сканирующая техника может

быть усовершенствована до такой степени, чтобы фиксировать положение объектов с точностью до долей угловой секунды, можно получить необходимые данные даже тогда, когда солнечного затмения нет.

Искривление световых лучей возникает как прямое следствие кривизны пространства-времени. Эксперименты, производимые на спутниках, о которых шла речь в разделе II, касаются другого аспекта кривизны пространства-времени; таким образом, обе группы экспериментов дополняют друг друга.

Имеется еще одна экспериментальная программа, посвященная исследованию кривизны пространства-времени, предложенная И. Шапиро (Массачусетский технологический институт). Свет, проходящий около края Солнца, будет не только отклоняться, но также несколько запаздывать из-за искажений, вносимых как в пространственные, так и во временные расстояния. Это запаздывание нельзя измерить обычными оптическими методами, потому что неизвестен момент, когда свет выходит из объекта, который представляется близким к Солнцу. Но современная радарная техника с успехом посылает радиоимпульсы на Луну и даже на Венеру и Меркурий и наблюдает отраженный сигнал, возвратившийся обратно. Шапиро предложил послать радарный сигнал на Меркурий и Венеру в тот момент, когда они находятся за Солнцем и приближаются к линии, соединяющей земного наблюдателя и край Солнца (так называемому *соединенику*); затем измеряется момент возвращения сигнала с такой точностью, которая могла бы обнаружить запаздывание сигнала; такая точность вполне достижима для современной радарной техники.

Смещение перигелия Меркурия было уже хорошо известно, но в 1915 г. Эйнштейн вывел из своей теории определенное выражение, которое, как оказалось, очень точно совпадало с данными, имеющимися у астрономов, занимающихся расчетами планетарных орбит. У эллипсов, по которым движутся планеты, есть тенденция изменять свою ориентацию в пространстве из-за возмущений, вносимых в их движение соседними планетами и Юпитером. На орбиту Меркурия, в частности, действуют возмущения главным образом со стороны соседней планеты — Венеры и Юпитера, наибольшего по массе тела солнечной системы после Солнца. Орбита Меркурия поворачивается в прост-

ранстве со скоростью, равной примерно одному угловому градусу в столетие. Теория возмущений планет, развитая до совершенства в XIX в. в основном французской математической школой, среди представителей которой следует упомянуть П. Лапласа (1749—1827), Дж. Лагранжа (1736—1813), У. Леверрье (1811—1877), позволила объяснить полностью все результаты наблюдений. Не удалось объяснить лишь один процент наблюдаемого смещения перигелия Меркурия. И вот это крохотное расхождение — 43 угловых секунды в столетие — смогла объяснить лишь общая теория относительности.

Это блестящее соответствие теории и эксперимента было поставлено под сомнение Дикке. Дикке заинтересовался некоторой модификацией теории тяготения Эйнштейна, которую сейчас называют *скалярно-тензорной теорией*; теория была независимо развита Эйнштейном и П. Бергманом, немецким физиком П. Иорданом и французом Р. Сири. Эти попытки опирались сначала на работу Т. Калуца (1886—1954), где он пробовал включить электромагнитное поле в геометрию пространства-времени; для этого ему пришлось постулировать существование пятого (ненаблюдаемого) измерения. Скалярно-тензорная теория отличается от схемы Калуца тем, что к гравитационному и электромагнитному полю добавляется еще одна переменная величина. Иордан пытался использовать эту дополнительную математическую величину для космологических целей, связав ее с предположением, высказанным в 1937 г. английским физиком П. Дираком.

Дирак отметил, что некоторые очень большие числа, появляющиеся в физике и космологии, оказываются по порядку величины близкими к 10^{20} , 10^{40} и 10^{80} . Так, например, отношение электромагнитной и гравитационной сил, действующих между двумя электронами, независимо от расстояния между ними, равно, грубо говоря, 10^{40} . В качестве другого примера мы приведем оценку полного числа протонов и нейтронов во Вселенной, размеры которой определяются по хаббловскому красному смещению. Это число оказывается равным 10^{80} . Исчерпывающая теория физической Вселенной должна давать объяснение этим числовым значениям, но такая задача представляется безнадежной. Дирак указал, что эта неприятная трудность не возникала бы, если бы все эти колоссальные числа не были бы подлинными постоянными, но менялись бы

достаточно медленно, так что их современные значения характеризовали бы всего лишь одно мгновение развития космоса. Каждая из них была бы в той или иной мере степенью одной из них, порядок которой был бы равен 10^{20} . Таким образом, все они разбиваются весьма четко на группы, которые отличаются друг от друга множителем 10^{20} .

Иордан предположил, что появившаяся в скалярно-тензорной теории дополнительная переменная может быть как раз той космологической переменной, о которой говорил Дирак. Дикке разделяет эту точку зрения. Принимая эту точку зрения, оба занялись поисками эффектов, которые могут быть вызваны медленными, но устойчивыми изменениями характеристик элементарных частиц и другими аспектами изменения уравнений поля. Новая теория также удовлетворяет принципу общей ковариантности; следовательно, никаких изменений в тех эффектах, которые объясняются непосредственно через принцип эквивалентности, ожидать не приходится.

Как указал Дикке, скалярно-тензорная теория приводит к слегка отличной скорости смещения перигелия по сравнению с теорией Эйнштейна; разность между ними составляет около одной десятой от эйнштейновского значения. В связи с этим Дикке снова вернулся ко всем возможным эффектам, влияющим на смещение перигелия Меркурия. Он обнаружил, что существует один эффект, на который до сих пор не обращали внимания. Речь идет о возможной сплюснутости Солнца у полюсов. Когда Ньютон развивал свою теорию планетарных орбит, он предполагал, что и Солнце и планеты имеют сферическую форму, поскольку гравитационное действие сферы ничем не отличается от гравитационного действия точечной массы. Заметное отклонение от сферической формы приводит к возмущениям планетарных орбит и вызывает смещение перигелия.

Сканируя по краю солнца и продолжая свои наблюдения в течение нескольких месяцев летом 1966 г., Дикке пытался исключить из окончательных результатов такие эффекты, как рефракцию в земной атмосфере, которая вызывает кажущееся сплющивание солнца (а также и луны), наблюдаемое простым глазом, когда солнце близко к горизонту. Так как Дикке искал сплюснутость солнца, составляющую менее 10^{-4} (одной десяти тысячной) солнечного радиуса, основную трудность составляло

исключение различных маскирующих эффектов. Дикке утверждал, что он действительно обнаружил сплюснутость солнца ожидаемой величины и в связи с этим заключил, что вместо сорока трех угловых секунд за столетие избыточное смещение перигелия, которое должны объяснить теории, уточняющие теорию Ньютона, составляет уже всего лишь тридцать девять угловых секунд.

Определение формы солнца с точностью лучшей, чем одна десятитысячная, — это настолько трудная задача, что результат, впервые полученный Дикке, должен быть подвергнут проверке с использованием новых данных; сам Дикке планирует продолжение своей деятельности в этом направлении. Более точное значение расхождения между наблюдаемым смещением перигелия Меркурия и значением смещения, в котором учтены все возмущающие эффекты других планет, будет вычислено заново группой сотрудников Массачусетского технологического института. В этих расчетах будут сочетаться лучшие известные данные относительно планетарных орбит, полученные обычными оптическими методами, с данными, которые предоставляет новая техника межпланетных радаров.

Разработка скалярно-тензорной теории и, быть может, других аналогичных допустимых теорий вовсе не закончена. Каковы бы ни были результаты дальнейших наблюдений, их значение в соперничестве между исходной теорией тяготения Эйнштейна и ее новыми вариантами представляется далеко не ясным. Но независимо от всех этих вопросов успешное определение формы Солнца с высокой точностью даст заметный вклад в понимание внутренней структуры солнца. Сейчас никто не сомневается в том, что внутренние области Солнца заполняет жидкое вещество; поэтому сплюснутая форма Солнца могла бы служить надежным доказательством того, что внутренние части Солнца находятся в быстром вращении; возможно что они вращаются в десять раз быстрее, чем вращается его видимая поверхность.

Этим можно было бы закончить краткое описание некоторых программ исследований, осуществляющихся в настоящее время с целью подтвердить или отвергнуть общую теорию относительности. Совершенно иные взаимоотношения между теорией тяготения и данными наблюдений стали возможны после открытия квазизвездных объектов (квазаров). Это открытие было сделано в 1963 г. Квазары

обнаруживают невероятно мощное свечение в сочетании с мощным излучением электромагнитных волн в радиодиапазоне. Частоты излучения оказываются сдвинутыми в сторону красной части спектра на весьма большую величину, которая меняется для известных в настоящее время квазаров от значения, чуть превышающего десять процентов, до значения, превосходящего сто процентов. Было выяснено также Г. Смитом (в настоящее время работающим в Техасском университете) и Доррит Гоффлейт (директор обсерватории Марии Митчелл), что некоторые из квазаров имеют переменную яркость с ясно выраженной периодичностью в несколько лет, на которую накладываются иногда неожиданные изменения с периодом в несколько дней или недель.

Сразу же после обнаружения квазаров все средства были брошены на выяснение вопроса о том, является ли наблюдаемое необычно большое красное смещение гравитационным или космологическим (эффект Хаббла); это обстоятельство важно для оценки расстояния этих объектов от Земли. Вывод, к которому пришли тогда и который принимается сейчас большинством специалистов, состоит в том, что красное смещение имеет космологическое происхождение, потому что нельзя придумать никакой разумной модели, которая могла бы объяснить большое гравитационное красное смещение наряду с другими данными по свечению и приблизительно известной температурой поверхности квазара. Если эта интерпретация не будет поколеблена, квазары отстоят от Земли на расстояние 10^9 — 10^{10} световых лет. Но отсюда следует, что подробное изучение распределения квазаров по небесной сфере может предоставить нам важную информацию о крупномасштабной структуре Вселенной. Согласно приведенной оценке расстояний астрономы не знают других объектов, которые могли бы сравняться с квазарами по их внутренней светимости; уже по одной этой причине никакой другой класс объектов, в том числе и большие галактики, не могут обеспечить нас подобной информацией. В связи с этим специалисты в области космологии, часто говорят о *стандартных свечах*, подразумевая под этим термином любой класс надежно отождествляемых астрономических объектов высокой светимости, которые — на это приходится надеяться — распределены по Вселенной хотя и беспорядочно, но более или менее равномерно. Чем ярче и, следовательно, чем

виднее каждая отдельная стандартная свеча, тем полезнее те данные, которые могут быть получены из статистической информации, касающейся ее кажущегося расстояния, светимости и красного смещения.

В 1966 г. Г. Арп (Паломарская обсерватория) опубликовал данные, из которых следовало, что невероятно большой процент квазаров оказался в кажущейся тесной близости с другими астрономическими объектами, расстояние которых от Земли было хорошо известно и составляло около 10^8 световых лет. Данные Арпа — статистические в том смысле, что они предполагают действительную ассоциацию квазаров с другими объектами не потому, что налицо видимая близость в отдельных случаях, а из-за того, что это имеет место для преобладающего числа случаев. Эти рассуждения не слишком надежны, и положиться на них безоговорочно нельзя. Если они все же окажутся верными, все принятые в настоящее время оценки светимости, массы, размеров и других характеристик квазаров должны снизиться на несколько порядков. Наблюдаемые красные смещения могут быть тогда гравитационного происхождения, указывая на крайне экзотическую структуру квазаров. Иначе, красное смещение может быть интерпретировано как доплеровское смещение. Последняя интерпретация означает, что все известные квазары удаляются от Земли с релятивистскими скоростями. Это едва ли можно допустить.

Если бы наблюдаемые красные смещения были гравитационными, квазары создавали бы самые сильные гравитационные поля, какие наблюдались где-либо во Вселенной. Квазары оказались бы самыми подходящими кандидатами для релятивистских лабораторий вне Земли, правда, не очень доступными лабораториями. Очевидно, квазары принадлежат к самым мало понятным астрономическим объектам, и каким бы ни оказалось их расстояние от Земли, они надолго сохранят свое очарование для тех, кто занимается теорией относительности.

21. Движение частиц

Релятивистская физика рассматривает большие массы с высокой концентрацией вещества, гравитационные волны и космологические проблемы. Это уже сложившийся круг вопросов. При рассмотрении этих проблем, как впро-