

VII. ВРАЩЕНИЕ ПЛАНЕТНЫХ ОРБИТ

«Тяготение к Солнцу... убывает в точности пропорционально квадратам расстояний даже до орбиты Сатурна, что следует из покоя афелиев комет, и даже до крайних афелиев комет, если только эти афелии находятся в покое»¹.

И. Ньютон

Закон всемирного тяготения выведен Ньютоном как теорема, вытекающая из аксиом механики в приложении к законам Кеплера, определяющим движение планет. Но законы Кеплера, строго говоря, не эмпирические, они — результат упрощения и обобщения действительных астрономических данных. Возмущающее действие других планет искажает кеплеровские эллипсы и, прежде всего заставляя их вращаться, так что афелий и перигелий (места наибольшего и наименьшего удаления планеты от Солнца на орбите) совершают добавочное вековое движение. Это вращение апсид (линий, соединяющих афелий и перигелий) было известно еще Кеплеру и определялось им с большой точностью. Вывод закона всемирного тяготения основан, в сущности, на том предположении, что при отсутствии других возмущающих тел изолированная планета будет вращаться вокруг Солнца (вернее — вокруг центра тяжести системы), строго следуя кеплеровским законам. Небесная механика действительно позволяет почти без остатка объяснить все эмпирические отклонения от законов Кеплера возмущающим действием других известных планет. Наоборот, по наличию неучтенных отклонений судят о существовании новых возмущающих факторов; так, Лаверрье предсказал существование Нептуна.

Тот же Лаверрье обнаружил вращение орбиты Меркурия, не учитываемое известными возмущающими факторами. По Лаверрье, перигелий Меркурия поворачивается за столетие на $40''^2$, и естественно было заподозрить наличие новой, неизвестной возмущающей планеты, которую Лаверрье заранее назвал Вулканом. Проходили десятки лет, а Вулкан, в противо-

положность Нептуна, не обнаруживался, и разрешение загадки вращения перигелия Меркурия стало очередной целью большого числа астрономических работ.

Прежде чем излагать различные теоретические объяснения, установим величину эффекта. Ньюком (1898 г.) тщательно просмотрел весь материал наблюдений, относящийся к вопросу, и получил для векового перемещения перигелия Меркурия величину, близкую к цифре Лаверрье, именно $43,49''$. Эта величина и принималась всеми до недавнего времени как очень точная. Однако недавно Гроссман [67] в Мюнхене пересмотрел вопрос с нуля и нашел, что даже на основании материала, использованного Ньюкомом, и тех же методов расчета, что и у последнего, но при несколько более точном вычислении получается цифра, меньшая $40''$. Далее, Гроссман произвел переоценку данных Ньюкома в отношении их точности, применил более надежные методы «сглаживания» наблюдений и измерил несколько, в соответствии с новыми данными, массу Венеры, входящую в расчеты. Окончательный результат Гроссмана колеблется от $29''$ до $38''$. Впоследствии Шази [68], учитывая наблюдения с меридианным кругом, нашел величину $34,96''$.

Повышение точности астрономических наблюдений позволило отыскать необъясненное вращение орбит и других планет помимо Меркурия. Кинле дает следующую таблицу значений вращения перигелия для разных планет:

Таблица 15

Планета	ω	Эйнштейн	Зельягер
Меркурий	$+6,18'' \pm 0,50$ $+8,62 \pm 0,50$	$+8,82''$	$+8,49''$
Венера	$-0,08 \pm 0,26$	$+0,06$	$+0,05$
Земля	$+0,21 \pm 0,13$	$+0,06$	$+0,07$
Марс	$+0,86 \pm 0,36$	$+0,13$	$+0,59$

Во втором столбце сопоставлены значения вращения перигелия, умноженные на эксцентриситеты орбит соответствующих планет. Значения третьего и четвертого столбца станут ясными из дальнейшего. Для Меркурия приведены минимальное и максимальное возможные значения вращения перигелия. Как видно из таблицы, эта величина даже для Меркурия не может считаться твердо установленной; по отношению к другим планетам неопределенность еще больше. Кинле указывает, помимо того, что обычный расчет вращения перигелия, когда оно рассматривается отдельно от возмущения других элементов движения планеты, в сущности говоря, не точен. Связь всех элементов неразрывна, и изменение одних влечет за

¹ Курсив наш.

² Общее вековое вращение перигелия Меркурия достигает приблизительно $572,70''$; из этой величины $529,21''$ объясняется возмущающим действием других планет; необъясненным остается приблизительно $43,49''$.

собой изменение других элементов. Но полное, точное решение задачи представляет непреодолимые трудности. Таким образом, вопрос о величине вращения планетных орбит остается довольно неопределенным как в отношении неточности наблюдений, так и в связи с неточностью расчетов.

После того как указано явление и его приблизительные размеры, можно перейти к теории, и прежде всего к теории относительности. Уже частная теория Эйнштейна приводит к результатам, не согласующимся с законом тяготения Ньютона [68]. В последнем фигурируют только массы и расстояние между ними, нет никакой зависимости масс от скорости, и самая сила тяготения, по крайней мере формально, соответствует чистому дальнему действию с бесконечной скоростью распространения. В частной теории относительности невозможны скорости, превышающие скорость света, а величины масс зависят от скорости их движения. Теория Ньютона в задаче о двух притягивающихся телах приводит к кеплеровскому движению по эллипсам, параболам или гиперболом, причем перигелий должен быть неподвижным. Если внести исправления в закон Ньютона соответственно формулам частной теории относительности, кеплеровское движение нарушится по той причине, что масса планеты будет разной в разных местах орбиты вследствие изменения скорости. Возникнет вращение всей орбиты, т. е. вращение перигелия. Можно отметить, что в этом следствии нет ничего специфического именно для тяготения. Если представить себе электрическую систему, в которой отрицательный заряд, связанный с массой, вращается вокруг положительного, подчиняясь кулоновскому закону обратных квадратов, то по законам механики получится чистое кеплеровское движение. Учитывая изменение массы со скоростью, мы должны получить и здесь вращение перигелия. Это рассуждение Зоммерфельд применил для описания движения электрона в атоме водорода и таким способом мог объяснить так называемую «тонкую структуру» спектральных линий¹. Однако такое объяснение вращения перигелия Меркурия с количественной стороны недостаточно, — получаются величины, раз в 6 меньше наблюдаемой.

В общей теории относительности, как математическое следствие, вытекает новый обобщенный закон гравитационных притяжений. В первом приближении он совпадает с ньютоновским законом, но далее начинаются расхождения. Строго говоря, закон Эйнштейна и закон Ньютона принципиально не сравнимы. В закон Ньютона входят массы и расстояния между ними, — эти понятия в теории Эйнштейна теряют абсолютное значение. Закон тяготения Эйнштейна не содержит никакого выражения, аналогичного «силе притяжения» у Ньютона, — этим законом непосредственно

¹ В современной теории квантов теория тонкой структуры спектральных линий получила несколько отличную интерпретацию, совершенно не противоречащую, однако, теории относительности и, наоборот, применяющую выводы последней.

определяется путь, по которому должна двигаться масса при заданных условиях. Этот закон одинаково определяет как движение светового луча в поле тяготения, так и пути планет. Для сравнения законов Ньютона и Эйнштейна можно сравнить, как должно двигаться какое-нибудь тело в поле тяготения согласно тому и другому закону. В задаче о двух телах, как уже говорилось, по Ньютону получается кеплеровское движение без вращения перигелия, по Эйнштейну — перигелий поворачивается на следующую величину:

$$\omega = \frac{6e \cdot \pi \cdot m}{a(1 - e^2)}, \quad (1)$$

где ω , как и раньше, — произведение эксцентриситета e на поворот перигелия, m — масса, a — большая полуось эллипса. В третьем столбце табл. 15 приведены значения ω , вычисленные для разных планет по этой формуле. В 1915 г., когда Эйнштейн впервые вывел формулу (1), была известна только цифра Ньютона для вращения перигелия Меркурия $8,48'' \pm 0,43''$; по формуле (1) получается $8,82''$, т. е. можно было говорить о поразительно точном согласии. Пересчеты Гроссмана значительно понизили цифру, и теперь можно говорить только о согласии в отношении порядка величины. Если принять во внимание указанную выше неопределенность в оценке вращения перигелия, то на лучшее совпадение трудно рассчитывать. В случае Венеры и Земли вращение перигелия настолько мало, что говорить о сравнении действительных и теоретических значений нельзя. В случае Марса действительное вращение значительно больше требуемого по формуле (1). Нужно надеяться, что новые астрономические наблюдения и вычисления позволят выяснить, имеем ли мы дело с реальным расхождением величин или же с неточностями наблюдений и расчетов. Временно вопрос о строгой количественной стороне дела остается открытым, и можно только сказать, что в отношении порядка величины теория Эйнштейна удовлетворительно объясняет аномалию движения Меркурия.

История догадок о причине вращения орбиты Меркурия имеет почти вековую длительность, и в этом вопросе у теории относительности немало конкурентов. Аномалию Меркурия можно объяснить двояко. Можно считать закон Ньютона совершенно точным и причину аномалий искать в присутствии других возмущающих масс. Придумать гипотетические массы, вызывающие вращение перигелия требуемой величины, конечно возможно. Вулкан Леверье и был такой гипотетической массой. Окончательно опровергнуть такое предположение невозможно, но, обратно, для того чтобы оно имело твердую почву, нужно дать независимое доказательство существования таких масс. Наиболее интересное предположение в этом смысле высказал Зеелигер. По его мнению, массы, возмущающие движение Меркурия и других планет, связаны с зодиакальным светом¹. Зодиакальный свет в тропиках

¹ Впервые такая гипотеза рассматривалась Ньютоном в качественной форме.

можно наблюдать в каждую ясную ночь, после заката или перед восходом солнца. В наших широтах он наблюдается плохо и редко. Этот слабый свет простирается от горизонта кверху в виде конуса с высотой, направленной вдоль линии зодиака. Иногда на противоположной стороне горизонта наблюдается еще более слабое свечение, так называемый «отблеск». В спектре зодиакального света существует непрерывный фон и отдельные линии, например желто-зеленая линия северных сияний. Обычно зодиакальный свет объясняют рассеянием солнечного света космической пылью и роями метеоритов. Эти массы, вызывающие зодиакальный свет, Зеелигер считает причиной вращения перигелия Меркурия. Он предполагает, что названные массы концентрированы по преимуществу в двух эллипсоидальных оболочках; размеры одной соответствуют приблизительно размерам орбиты Меркурия, другая доходит почти до земной орбиты. Результаты расчетов Зеелигера даны в четвертом столбце таблицы. Для Меркурия получается прекрасное совпадение с цифрой Ньюкома, чему, конечно, не приходится удивляться, ибо в расчеты входят произвольные постоянные, выбираемые так, чтобы указанное согласие получилось. Разумеется, теорию Зеелигера можно с одинаковым успехом приспособить и к цифрам Гроссмана. Соображения Зеелигера имеют преимущество указания реального возмущающего фактора. Но до тех пор, пока иными путями не будет устранена произвольность в выборе значений для массы космической пыли и ее распределения, гипотеза Зеелигера останется только возможностью. Нужны новые исследования свойств и особенностей зодиакального света, только таким путем можно разрешить альтернативу: возмущающие действия или обобщение закона тяготения. Если принять факт отклонения световых лучей в поле тяготения, согласно теории Эйнштейна, доказанным, то вращение перигелия станет необходимым следствием и гипотеза Зеелигера автоматически отпадет.

Другой способ объяснить аномалии движения планет — применить иной закон тяготения. Таких попыток было много, некоторые из них привели к выражениям для вращающегося перигелия, в точности совпадающим с формулой Эйнштейна (1). В этих гипотезах, созданных именно для данного случая, нельзя усмотреть ни подтверждения, ни отрицания теории, как нам приходилось говорить уже много раз. Изложение многочисленных неправильных законов тяготения вышло бы из рамок этой книги.

VIII. СМЕЩЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ

«Если значение слов определить по тому смыслу, в каком эти слова обычно употребляются, то под названиями время, пространство, место и движение и следует разуметь эти постижимые чувствами меры их».

«Тот, кто отыщет гипотезу, по которой вода, будучи столь разреженной, в то же время не способна к сжатию силой, сумеет, несомненно, при помощи той же гипотезы представить золото, воду и все другие тела сколько ему угодно разреженными».

И. Ньютон

Уже в первом варианте общего принципа относительности, в 1907 г., Эйнштейн указал такое необходимое следствие эквивалентности поля тяготения и равномерного ускорения системы отсчета: всякий физический периодический процесс («ход часов»), происходящий в некотором поле тяготения с потенциалом Φ , должен казаться наблюдателю замедленным. Иными словами, местное время, определяемое какими угодно физическими часами, будет меняться в зависимости от поля тяготения. Если обозначить через ν_0 частоту колебаний часов в секунду в пространстве с потенциалом тяготения Φ_0 , а через ν — частоту в пространстве с потенциалом Φ , то в первом приближении, по общему принципу относительности,

$$\frac{\nu - \nu_0}{\nu} = -\frac{\Phi_0 - \Phi}{c^2}. \quad (1)$$

Потенциал $\Phi = \frac{kM}{r}$, где k — постоянная закона тяготения Ньютона, M — масса светила, r — расстояние от его центра до данной точки. Наиболее удобным (если не единственным) физическим явлением, позволяющим проверить следствие (1), служит волнообразный световой процесс. Определенная спектральная линия какого-либо атома — наиболее совершенные «часы», которые только можно себе представить. Ширина спектральной линии атома, излучающего в разреженном пространстве,