

РАЗДЕЛ I

ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ

ГЛАВА 1

УРАВНЕНИЯ ТЯГОТЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА

§ 1. Равенство инертной и гравитационной масс

Современная теория тяготения, сформулированная в 1916 г. Альбертом Эйнштейном, явилась развитием специальной теории относительности (СТО) и поэтому часто называется «общей теорией относительности» (ОТО).

Суть СТО выражена в преобразованиях Лоренца для координат и времени и соответствующих законах преобразования таких физических величин, как энергия, импульс и т. д. Все предположения и выводы СТО — постоянство скорости света, зависимость массы от скорости, дефект массы и его связь с энергией системы, растяжение времени при быстром движении на примере распада частиц — подтверждены опытом. СТО вошла в практику инженерных расчетов. Поэтому в правильности СТО никаких сомнений нет.

Общая теория относительности (ОТО) находится в совершенно ином положении. Опыты, специфически подтверждающие ОТО, до сих пор немногочисленны. К ним относятся движение перигелия Меркурия, отклонение света в поле тяжести Солнца, изменение частоты света в поле тяжести и релятивистское запаздывание радиолокационных сигналов, проходящих вблизи солнечного диска. По существу, главным аргументом в пользу ОТО является тот известный каждому школьнику исходный факт, который вдохновил Эйнштейна — пропорциональность веса и массы, т. е. равенство ускорения различных тел в поле тяжести.

Закон тяготения Ньютона $F = -\frac{Gm_1m_2}{r^2}$ очень похож на закон Кулона $F = \frac{e_1e_2}{r^2}$. Естественно, возникает вопрос, почему так различны по своему содержанию теория электромагнитного поля, которая рассматривается в евклидовом пространстве, и ОТО с понятием кривизны пространства; нельзя ли поле тяготения также описывать как какое-то поле в евклидовом пространстве?

Ниже будет показано, что СТО и квантовая механика делают логически неизбежным характерное для ОТО искривление пространства — времени. ОТО является не только математически наиболее изящной и стройной, но и физически необходимой теорией тяготения.

Как уже подчеркивалось, самой важной особенностью поля тяготения является то, что оно совершенно одинаково действует на различные тела, сообщая им одинаковые ускорения. Этот факт был установлен еще Галилеем. Поле тяготения тем самым в корне отличается от всех других известных в физике полей.

Естественно, что в последнее время, когда наблюдается оживление интереса к теории тяготения, одной из первых задач было экспериментальное выяснение вопроса о фактической точности вывода об одинаковости ускорений, сообщаемых полем тяготения разным телам. Иначе этот принцип формулируется как принцип строгой пропорциональности инертной и весомой массы. Последняя формулировка особенности действия поля гравитации на тела эквивалентна предыдущей. Действительно, в уравнениях движения тела в поле тяжести

$$m_{\text{и}} \frac{d^2 r}{dt^2} = - m_{\text{г}} \text{grad } U$$

слева стоит инертная масса, а справа гравитационная. Если для любых тел $m_{\text{и}} = \alpha m_{\text{г}}$, то масса слева и справа сокращается, и мы приходим к закону Галилея, поскольку масса вообще не входит в уравнения движения. Множитель α , очевидно, зависит только от единиц измерения и его выбирают равным единице.

В 1890 г. Этвеш применил чрезвычайно точный способ для проверки пропорциональности гравитационной и инертной масс. Суть опыта состояла в следующем. Всякое тело, находящееся на поверхности Земли и покоящееся относительно Земли, подвергается действию притяжения не только со стороны Земли, но также со стороны Солнца, Луны и других небесных тел. На тело действуют также центробежные силы, связанные с суточным вращением Земли вокруг своей оси, с годовым обращением Земли вокруг Солнца, с месячным взаимным обращением центра Земли вокруг центра тяжести системы Земля — Луна.

Притяжением планет и других небесных тел можно пренебречь. Точно так же можно пренебречь ускорениями, связанными с движением Солнца в Галактике и т. д. Ускорение земного тяготения около 980 см/сек^2 , центробежное ускорение суточного вращения на широте Москвы около $1,5 \text{ см/сек}^2$. Ускорение солнечного поля тяготения на орбите Земли около $0,5 \text{ см/сек}^2$: центробежное ускорение годового вращения Земли, очевидно, также равно $0,5 \text{ см/сек}^2$. Действие Луны характеризуется ускорением $4 \cdot 10^{-3} \text{ см/сек}^2$.

Представим себе два тела, A и B , равной массы, уравновешенные на коромысле, подвешенном за середину к тонкой нити. Силы притяжения к Земле, к Солнцу и Луне пропорциональны гравитационной массе, центробежные силы пропорциональны инертной массе.

Для тел с одинаковым соотношением инертной и весовой масс результирующая сила, действующая на каждое тело, имеет одинаковое направление. Равновесие при определенном положении коромысла сохранится и при любом повороте коромысла относительно земной оси и относительно Солнца. Если же отношения масс разные, то при коромысле, установленном перпендикулярно к направлению центробежных сил, эти силы не будут уравновешены и вызовут поворот коромысла вокруг оси, совпадающей с нитью, на которой подвешено коромысло. Центробежная сила суточного вращения больше центробежной силы годового вращения; однако поворот коромысла относительно Солнца совершается просто в процессе вращения Земли, без изменения взаимного расположения коромысла и окружающих его лабораторных предметов и рельефа поверхности Земли. Поэтому практически удобнее следить за тем, испытывает ли коромысло повороты в зависимости от его ориентации относительно Солнца.

Из отсутствия таких поворотов Этвеш сделал вывод, что отношение весовой и инертной масс для разных тел различается не более, чем на 10^{-8} . В последнее время в США опыты Этвеша были повторены Дикке (1961), Роллом, Кротковым и Дикке (1964) и в Советском Союзе Брагинским, Пановым (1971). Группа Дикке довела точность до 10^{-10} , а группа Брагинского до 10^{-12} . Их результаты совпадают с результатом Этвеша: отношение гравитационной и инертной масс разных веществ совпадают. Но, по Брагинскому, точность этого совпадения 10^{-12} ! Остановимся на смысле полученного результата.

Инертная масса зависит от энергии — это вывод СТО. Действительно, из СТО известно, что когда два атома дейтерия соединяются в один атом гелия, то инертная масса уменьшается приблизительно на $6 \cdot 10^{-3}$ своей величины в соответствии с дефектом масс гелия и дейтерия. Точные определения массы при помощи масс-спектрографа, с одной стороны, и прямые измерения энергии ядерных реакций, — с другой, подтверждают этот вывод СТО.

От чего же зависит гравитационная масса тела, и, следовательно, сила, испытываемая им в поле тяготения? Зависит ли она от числа барионов в теле, т. е. от барионного заряда, наподобие того как электростатическое притяжение зависит от электрического заряда, или эта сила зависит от полной энергии тела? Для обычных веществ (не мезонов, не антивещества) число барионов и инертная масса приблизительно пропорциональны

друг другу с расхождениями около 10^{-3} . Поэтому при малой точности опыт типа Этвеша не мог бы решить вопрос. Однако точность опыта 10^{-12} приводит к категорическому выводу о том, что сила тяжести пропорциональна именно энергии тела, как и инертная масса. Такая точность означает прочность фундамента ОТО.

Эксперимент Этвеша показывает, что притяжение не определяется барионным зарядом тела и всемирное тяготение нельзя представлять себе наподобие электростатического притяжения разноименных электрических зарядов. Поэтому абсолютно ошибочны и антинаучны представления о том, что какие-то частицы, например, так называемая антиматерия (позитроны, антипротоны, антинейтроны), могут испытывать «антигравитацию». Из опытов на ускорителях хорошо известно, что для создания античастиц нужно затратить энергию; эта энергия является источником массы античастицы, античастица имеет весомую массу, в точности такую же, как и соответствующая частица. Косвенным доказательством этого являются и опыты Этвеша и Дикке.

Ли и Янг (1955) (см. также работу Дикке (1962)) ставили вопрос, нет ли *наряду* со всемирным тяготением еще аналога кулоновских сил, пропорциональных числу нуклонов; опыты Этвеша и Дикке показывают, что таких сил нет или, точнее, что если есть, то во всяком случае эти силы находятся за пределами точности опыта; для этого нужно, чтобы предполагаемые Янгом и Ли силы были в 10^7 раз слабее гравитационных и в 10^{43} раз слабее кулоновских (для двух протонов *).

Подчеркнем, что если бы силы, связанные с барионным зарядом, существовали, то ОТО тем не менее осталась бы в силе. Правда, в этом случае выявить из опыта фундаментальные факты, лежащие в основе ОТО, было бы гораздо сложнее.

§ 2. Основная идея ОТО

Ньютону представлялось очевидным, что физическое пространство — евклидово; существуют параллельные линии, сумма углов треугольника с прямыми сторонами равна π , длина окружности равна $2\pi r$ и т. д., а время течет всегда и везде одинаково.

Сама идея, что свойства пространства могут быть иными (например, сумма углов треугольника зависит от его площади), возникла гораздо позже. Математически такие пространства были открыты и исследованы Лобачевским.

*) Существование сил Ли и Янга невозможно в однородной изотропной космологической модели (см. об этом гл. 22 нашей книги «Релятивистская астрофизика»).