



ТЯГОТЕНИЕ

Авторы: Д. В. Гальцов

ТЯГОТЕНИЕ (гравитация, всемирное тяготение), фундаментальное взаимодействие, носящее характер притяжения, которому подвержены все виды материи в природе. Т. играет определяющую роль в жизни на Земле, является осн. силой для планетных и звёздных систем, галактик и в масштабах космологич. эволюции Вселенной в целом. Но Т. практически не сказывается на поведении атомных и др. микроскопич. систем и во взаимодействиях элементарных частиц вплоть до энергий порядка планковской (10^{19} ГэВ), которая была достижима лишь в самые ранние моменты существования Вселенной.

Совр. понимание Т. складывалось на протяжении мн. веков. Его существование было очевидно с самого момента зарождения человеческого сознания, однако понимание его сути и количественное описание пришло лишь в 16 в. в результате работ Г. [Галилея](#) и особенно И. [Кеплера](#), установившего законы движения планет. Решающий шаг был сделан И. [Ньютоном](#), который сформулировал законы механики и вывел в 1687 формулу для силы притяжения F двух точечных масс m_1 , m_2 , находящихся на расстоянии r друг от друга:

$$F = Gm_1m_2/r^2,$$

которая и составляет [всемирного тяготения закон](#) (G – [гравитационная постоянная](#)).

Если рассматривать одну из масс как пробную $m_1 = m$, а вторую – как источник гравитац. поля $m_2 = M$, то силу F с учётом направления можно представить в виде $\boldsymbol{F} = -m\nabla\varphi$, $\varphi = GM/r$, где φ – ньютоновский потенциал. Масса пробного тела играет роль гравитац. заряда; та же самая величина стоит в уравнении движения (инертная масса), выражающем 2-й закон Ньютона для ускорения $\boldsymbol{a}: m\boldsymbol{a} = -m\nabla\varphi$. Т. о., ускорение всех тел в заданном гравитац. поле должно быть одинаковым. Стоящее за этим равенство инертной и гравитац. масс

проверялось И. Ньютоном, в 19 в. с большей точностью Л. фон [Этвёшем](#) (соответствующие опыты проводятся и ныне с использованием совр. технологий). Оно сыграло важнейшую роль при создании А. [Эйнштейном](#) общей теории относительности (ОТО), которая стала основой для понимания Т. в 20 в. (см. [Относительности теория](#)).

Хотя ньютоновская теория Т. объясняет законы Кеплера в Солнечной системе, но она основана на представлении о мгновенном характере распространения гравитац. взаимодействия, которое к нач. 20 в. стало подвергаться сомнению. Специальная теория относительности (СТО) объяснила необходимость учёта конечной скорости распространения взаимодействий в электродинамике, но сама аналогия между ньютоновским и кулоновским потенциалами подсказывала, что при скоростях, не малых по сравнению со скоростью света c , уравнение для гравитац. потенциала должно быть иным. При построении релятивистской теории Т. независимость движения тел в гравитац. поле от их массы, а также тесно связанный с этим [эквивалентности принцип](#) сил инерции и гравитации сыграли определяющую роль. Ускорение свободно движущегося тела в неинерциальной системе отсчёта равно ускорению самой системы и также не зависит от массы. Поэтому можно исключить гравитац. поле, рассматривая систему отсчёта, свободно падающую в этом поле, представляя т. о. гравитац. силу как силу инерции. Эти рассуждения, строго говоря, справедливы лишь для точечных тел (слабый принцип эквивалентности), но можно предположить (что и было сделано А. Эйнштейном), что они имеют более общий характер и применимы для др. явлений (сильный принцип эквивалентности). В таком случае для описания Т. нужно перезаписать уравнения, выражающие законы физики, для неинерциальных систем отсчёта, что с точки зрения концепции пространства событий (пространства-времени) означает использование в нём криволинейных координат.

Переход к формулировке уравнений в произвольных координатах в пространстве событий приводит к выражению для интервала ds в виде $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$, $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$, где $g_{\mu\nu}$ – [метрика пространства-времени](#). Теперь это симметричный тензор, от которого требуется только приводимость в любой фиксированной точке к виду метрики Минковского $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$. Любая теория, согласно

принципу общей ковариантности, должна быть записана в терминах величин, преобразующихся как тензоры в многообразиях, отсюда и назв. общая теория относительности. Свободная точечная частица любой ненулевой массы в ОТО движется по геодезической мировой линии, которая представляет собой кратчайшее расстояние между событиями и одновременно кривую, вдоль которой касательный вектор (четырёхмерная скорость) $u^\mu = dx^\mu/ds$ переносится параллельно. Наиболее просто уравнение геодезической записывается для ковариантного вектора четырёхмерной скорости $u_\mu = u^\nu g_{\mu\nu}$: $\frac{du_\mu}{ds} = -\frac{1}{2} \frac{\partial g_{\nu\lambda}}{\partial x_\mu} u^\nu u^\lambda$. При этом квадрат четырёхмерного вектора скорости будет оставаться постоянным и равным (для частицы с ненулевой массой покоя) $u^\mu u^\nu g_{\mu\nu} = 1$. При движении с нерелятивистской скоростью и определённом задании метрики в т. н. синхронной системе отсчёта уравнение геодезической сводится к уравнению механики Ньютона. Однако фотон, имеющий нулевую массу, будет двигаться со скоростью света вдоль др. геодезической – изотропной, для которой $u^\mu u^\nu g_{\mu\nu} = 0$. Луч света от далёкой звезды, проходящий вблизи края Солнца, будет отклоняться на угол $\Delta\psi = 4GM_\odot / (c^2 R_\odot)$, который вычислил А. Эйнштейн в 1915 и впервые измерил А. Эддингтон в 1919 во время солнечного затмения, подтвердив это предсказание (M_\odot и R_\odot – масса и радиус Солнца).

Фотон, распространяющийся в гравитац. поле, изменяет не только направление, но и частоту ω согласно соотношению $\omega \sqrt{g_{00}(x^i)} = \text{const}$ (в статич. поле).

Аналогичная формула имеет место для изменения хода часов, находящихся в разных пространственных точках: $\Delta t \sqrt{g_{00}(x^i)} = \text{const}$. Этот эффект также был проверен с большой точностью в гравитац. поле Земли. Ещё одно наблюдаемое явление ОТО – запаздывание радиосигналов при их распространении в гравитац. поле (эффект Шапиро). С большой точностью измерены и поправки к законам Кеплера, предсказываемые теорией тяготения Эйнштейна, в частности смещение перигелиев планет и запаздывание радиосигналов в Солнечной системе. Ещё более впечатляющая проверка ОТО стала возможной после открытия двойных пульсаров, в которых постньютоновские поправки значительно больше и могут быть измерены косвенно на основе анализа приходящих периодич. сигналов.

В силу принципа эквивалентности отличить истинное гравитац. поле от эффектов

неинерциальности системы отсчёта по виду метрики в некоторой заданной точке пространства-времени невозможно. Но это можно сделать, рассматривая изменение метрики в соседних точках. При этом первые производные от метрики всегда можно обратить в нуль выбором свободно падающей системы отсчёта, однако вторые производные уже содержат информацию о кривизне пространства-времени, наличие которой и отличает гравитацию от инерции. Выбирая в качестве координат в окрестности некоторой точки x_0^μ расстояния вдоль исходящих из неё в независимых направлениях геодезич. линий, можно построить нормальные римановы координаты, в которых метрика содержит тензор кривизны Римана – Кристоффеля. Этот тензор нельзя обратить в нуль преобразованием координат, поэтому его отличие от нуля является признаком истинного гравитац. поля. Тензор кривизны, однако, не входит в уравнения геодезических и в уравнения Максвелла для электромагнитного поля, в чём и проявляется принцип эквивалентности. Такая связь материи с гравитац. полем называется минимальной. В некоторых модификациях теории Эйнштейна, которые востребованы в связи с проблемами космологии, используются теории с неминимальной гравитац. связью, в уравнения которых тензор Римана или его свёртки по индексам входят явно. Именно эти величины входят в уравнения Эйнштейна, связывающие геометрию пространства событий с распределением материи, задаваемым симметричным по индексам тензором энергии-импульса $T_{\{\mu\nu\}}$. В общем случае источником гравитац. поля являются не только энергия-импульс, но и натяжения, составляющие пространственную часть тензора энергии-импульса $T_{\{ij\}}$. Эти величины могут порождать не только гравитац. притяжение, но и отталкивание (напр., доменная стенка, аналогичная растянутой плёнке с отрицат. давлением). Это играет важную роль в понимании динамики ранней Вселенной (см. [Инфляционная модель Вселенной](#)).

В ОТО ньютоновский потенциал заменяется на метрику, которая имеет 6 физически независимых компонент и определяется из уравнения Эйнштейна. В уравнении Эйнштейна тензор, построенный из вторых производных от метрики, приравнивается тензору энергии-импульса материи. Последний удовлетворяет ковариантному закону сохранения: $\nabla_\mu T_\mu^\nu = 0$, который означает замкнутость материальной системы. Именно это обстоятельство и было решающим при создании А. Эйнштейном ОТО.

Уравнения Эйнштейна представляют собой 6 нелинейных дифференциальных уравнений 2-го порядка, которые следует решать, дополнив начальными и граничными условиями. Однако информация о гравитац. поле фактически содержится в тензоре кривизны, половина компонент которого связана с тензором энергии-импульса алгебраически.

Ковариантное тождество $\nabla_{\mu}T_{\mu}^{\nu}=0$ в отличие от своего аналога в СТО, не влечёт за собой законов сохранения энергии и импульса. Это неудивительно, поскольку законы сохранения следуют из симметрий пространства-времени, которые в общем случае искривлённого пространства отсутствуют. Однако метрики могут иметь симметрии, называемые изометриями, если они не изменяются при бесконечно малом преобразовании координат вдоль некоторого заданного направления. Пространство Минковского в СТО имеет макс. десятипараметрическую группу изометрий, обуславливающую законы сохранения импульса и момента импульса материи. В случае ОТО, как правило, законов сохранения меньше.

ОТО предсказывает существование чёрных дыр, что надёжно доказано астрономич. наблюдениями. Чёрная дыра – коллапсирующий объект, который для удалённого наблюдателя лишь асимптотически приближается к гравитационному радиусу r_g . Однако в падающей вместе с материей системе отсчёта этот объект представляется как уходящий под гравитац. радиус за время порядка r_g/c . Согласно теории, в центрах галактик могут находиться чёрные дыры массой порядка 10^8 масс Солнца, а звёзды массой больше 3 масс Солнца могут заканчивать свою эволюцию гравитационным коллапсом. Поверхность $r=r_g$ – горизонт событий – ограничивает область пространства, откуда не могут выходить частицы и лучи света, столь сильное гравитац. притяжение.

В 1973 С. Хокинг показал, что, комбинируя законы ОТО с принципами квантовой теории поля, можно прийти к выводу, что чёрные дыры «испаряются», постепенно теряя энергию в результате рождения частиц, преим. безмассовых. Фактически этот процесс локализован в некоторой области вне горизонта событий и не противоречит невозможности выхода частиц из чёрной дыры. Для чёрных дыр массой порядка массы Солнца и больше этот эффект чрезвычайно мал, однако он может стать

большим для микроскопич. чёрных дыр, которые в принципе могли образоваться в ранней Вселенной и сохраниться как реликтовые объекты (что до сих пор не подтверждено наблюдениями). Это порождает проблему нарушения когерентности в квантовой теории поля. Решение этой проблемы, вероятно, связано с квантовой гравитацией, природа которой пока не вполне ясна (см. [Квантовая теория тяготения](#)). Однако в теории [суперструн](#), претендующей на роль такой теории, эта проблема находит своё решение.

ОТО предсказывает также существование [гравитационных волн](#) и их излучение при движении тяготеющих масс. Открытие двойного пульсара PSR B1913+16 в 1974 позволило начать косвенные наблюдения гравитац. излучения по изменению параметров орбиты, которое достигло большой точности и находится в согласии с предсказаниями ОТО. Прямые эксперименты по поиску гравитац. волн с помощью лазерных интерферометров оказались успешными: 11.2.2016 группа учёных, работающих в проекте LIGO (США), заявила об обнаружении 14.9.2015 гравитац. волн. По их расчётам, гравитац. волны возникли в результате слияния двух чёрных дыр массой в 29 и 36 раз больше массы Солнца ок. 1,3 млрд. лет назад. Планируется изучение первичных гравитационно-волновых возмущений в ранней Вселенной, сообщения об обнаружении которых группа BICEP2 опубликовала в 2013, но эти данные были позднее опровергнуты.

В нач. 21 в. появился интерес к альтернативным теориям Т., связанный с развитием наблюдательной [космологии](#), показавшей, что наблюдаемая (светящаяся) материя в космосе составляет лишь малую часть всей материи. Большая часть скрывается в нерелятивистской ([тёмная материя](#)) и в ультрарелятивистской ([тёмная энергия](#)) формах. Альтернативным объяснением этих наблюдений может быть несправедливость ОТО на космологич. масштабах и при сверхвысоких энергиях. В качестве альтернативы рассматриваются также скалярно-тензорные теории, теории с массивным [гравитоном](#), теории с дополнит. измерениями, теории с неминим. гравитац. связью и др. Новые модели [гравитационного взаимодействия](#) предсказываются теорией суперструн, другие рассматриваются как феноменологические. Одна из таких моделей предполагает, что на малых расстояниях гравитация становится многомерной и сильной (соответствующей планковской энергии), но её наблюдаемая

слабость обусловлена тем, что осн. часть силовых линий уходит в дополнит. измерения. Эта теория предсказывает возможность рождения чёрных дыр на ускорителях. Поиск такого процесса ведётся на Большом адронном коллайдере, но пока не увенчался успехом.

Литература

Лит.: Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Теория тяготения и эволюция звезд. М., 1971;
Гальцов Д. В. Частицы и поля в окрестности черных дыр. М., 1986; Хокинг С.,
Пенроуз Р. Природа пространства и времени. СПб., 2014.

Loading [MathJax]/jax/element/mml/optable/GeneralPunctuation.js