

использовать в тех случаях, когда гравитац. поля настолько сильны, что разгоняют движущиеся в них тела до скорости порядка скорости света c . Скорость, до к-рой разгоняется тело, свободно падающее из бесконечности (предполагается, что там оно имело пренебрежимо малую скорость) до нек-рой точки, равна по порядку величины корню квадратному из модуля гравитац. потенциала ϕ в этой точке (на бесконечности ϕ считается равным нулю). Т. о., теорию Ньютона можно применять только в том случае, если

$$|\phi| \ll c^2. \quad (4)$$

В полях T . обычных небесных тел это условие выполняется. Так, на поверхности Солнца $|\phi|/c^2 \approx 4 \cdot 10^{-6}$, а на поверхности белых карликов — порядка 10^{-3} .

Кроме того, ньютонова теория неприменима и к расчёту движения частиц даже в слабом поле T ., удовлетворяющем условию (4), если частицы, пролетающие вблизи массивных тел, уже вдали от этих тел имели скорость, сравнимую со скоростью света. В частности, теория Ньютона неприменима для расчёта траектории света в поле T . Наконец, теория Ньютона не используется при расчётах переменного поля T ., создаваемого движущимися телами (напр., двойными звёздами) на расстояниях $r > \lambda = ct$, где t — характерное время движения в системе (напр., период обращения в системе двойной звезды). Действительно, согласно ньютоновой теории, поле T . на любом расстоянии от системы определяется положением масс в тот же момент времени, в к-рый определяется поле. Это означает, что при движении тел в системе изменения гравитац. поля, связанные с перемещением тел, мгновенно передаются на любое расстояние r . Но, согласно спец. теории относительности, изменение поля не может распространяться со скоростью, большей c .

Обобщение теории T . на основе спец. теории относительности было сделано Эйнштейном в 1915—16. Новая теория была названа её творцом общей теорией относительности.

Принцип эквивалентности

Самой важной особенностью поля T ., известной в ньютоновой теории и положенной Эйнштейном в основу его новой теории, является то, что T . совершенно одинаково действует на разные тела, сообщая им одинаковые ускорения независимо от их массы, хим. состава и др. свойств. Этот факт был установлен опытным путём ещё Г. Галилеем (G. Galilei) и может быть сформулирован как принцип строгой пропорциональности гравитационной, или тяжёлой, массы $m_{гр}$, определяющей взаимодействие тела с полем T . и входящей в закон (1), и инертной массы $m_{ин}$, определяющей сопротивление тела действующей на него силе и входящей во второй закон механики Ньютона (см. *Ньютона законы механики*). Действительно, ур-ние движения тела в поле T . записывается в виде

$$m_{ин} a = F = m_{гр} g, \quad (5)$$

где a — ускорение, приобретаемое телом под действием напряжённости гравитац. поля g . Если $m_{гр}$ пропорц. $m_{ин}$ и коэф. пропорциональности одинаков для любых тел, то можно выбрать единицы измерения так, что этот коэф. станет равным единице, $m_{гр} \equiv m_{ин}$; тогда они сокращаются в ур-нии (5) и ускорение a не зависит от массы и равно напряжённости g поля T ., $a = g$, в согласии с законом Галилея. (О совр. эксперим. подтверждении этого фундам. факта см. ниже.)

Т. о., тела разной массы и природы движутся в заданном поле T . совершенно одинаково, если их нач. скорости были одинаковыми. Этот факт показывает глубокую аналогию между движением тел в поле T . и движением тел в отсутствие T ., но относительно ускоренной системы отсчёта. Так, в отсутствие T . тела разной массы движутся по инерции прямолинейно и равномерно. Если наблюдать эти тела, напр., из кабины космич. корабля, к-рый движется вне полей T . с пост. ускорением за счёт работы двигателя, то, естественно, по отношению к кабине все тела будут

двигаться с пост. ускорением, равным по величине и противоположным по направлению ускорению корабля. Движение тел будет таким же, как падение с одинаковым ускорением в пост. однородном поле T . Силы инерции, действующие в космич. корабле, летящем с ускорением, равным ускорению свободного падения на поверхности Земли, неотличимы от сил гравитации, действующих в истинном поле T . в корабле, стоящем на поверхности Земли. Следовательно, силы инерции в ускоренной системе отсчёта (связанной с космич. кораблём) эквивалентны гравитац. полю. Этот факт выражается принципом эквивалентности Эйнштейна. Согласно этому принципу, можно осуществить и процедуру, обратную описанной выше имитации поля T . ускоренной системой отсчёта, а именно, можно «уничтожить» в данной точке истинное гравитац. поле введением системы отсчёта, движущейся с ускорением свободного падения. Напр., в кабине космич. корабля, свободно (с выключенными двигателями) движущегося вокруг Земли в её поле T ., наступает состояние невесомости — не проявляются силы T .

Эйнштейн предположил, что не только механич. движение, но и вообще все физ. процессы в истинном поле T . с одной стороны, и в ускоренной системе в отсутствие T ., с другой, протекают по одинаковым законам. Этот принцип получил назв. «сильного принципа эквивалентности», в отличие от «слабого принципа эквивалентности», относящегося только к законам механики.

Основная идея теории тяготения Эйнштейна

Рассмотренная выше система отсчёта (космич. корабль с работающим двигателем), движущаяся с пост. ускорением в отсутствие поля T ., имитирует только однородное гравитац. поле, однаконое по величине и направлению во всём пространстве. Но поля T ., создаваемые отд. телами, не таковы. Для того чтобы имитировать, напр., сферич. поле T . Земли, нужны ускоренные системы с разным направлением ускорения в разл. точках. Наблюдатели в разных системах, установив между собой связь, обнаружат, что они движутся ускоренно относительно друг друга, и тем самым установят присутствие истинного поля T . Таким образом, истинное поле T . не сводится просто к введению ускоренной системы отсчёта в обычном пространстве, или, точнее, в пространстве-времени спец. теории относительности. Однако Эйнштейн показал, что если, исходя из принципа эквивалентности, потребовать, чтобы истинное гравитац. поле было эквивалентно локальным соответствующим образом ускоренным в каждой точке системам отсчёта, то в любой конечной области пространство-время окажется искривлённым — неевклидовым. Это означает, что в трёхмерном пространстве геометрия, вообще говоря, будет неевклидовой, а время в разных точках будет течь по-разному. Т. о., согласно теории тяготения Эйнштейна, истинное гравитац. поле является не чем иным, как проявлением искривления (отличия геометрии от евклидовой) четырёхмерного пространства-времени.

В отсутствие T . движение тела по инерции в пространстве-времени спец. теории относительности изображается прямой линией, или, на матем. языке, экстремальной (геодезич.) линией. Идея Эйнштейна, основанная на принципе эквивалентности и составляющая основу теории T ., заключается в том, что и в поле T . все тела движутся по геодезич. линиям в пространстве-времени, к-рое, однако, искривлено, и, следовательно, геодезич. линии уже не прямые.

Массы, создающие поле T ., искривляют пространство-время. Тела, к-рые движутся в искривлённом пространстве-времени, в этом случае движутся по одним и тем же геодезич. линиям независимо от массы или состава тела. Наблюдатель воспринимает это движение как движение по искривлённым траекториям в трёхмерном пространстве с переменной скоростью. Но с самого начала в теории Эйнштейна заложено, что искривление траектории, закон изменения скорости — это свойства пространства-времени, свойства геодезич. линий в этом пространстве-времени, а следовательно, ускорение любых тел должно быть одина-