

Общая астрономия. Гравитация от Ньютона до Эйнштейна

Гравитация от Ньютона до Эйнштейна. (информация для тех, кто пытается перевернуть мир новыми теориями)



Все
весомые
тела
взаимно



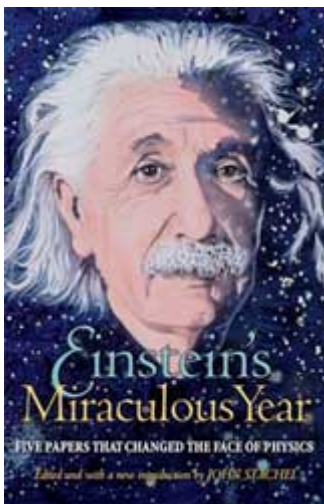
испытывают тяготение, эта сила обуславливает движение планет вокруг солнца и спутников вокруг планет. Теория гравитации - теория созданная Ньютоном, стояла у колыбели современной науки. Другая теория гравитации, разработанная Эйнштейном, является величайшим достижением теоретической физики 20 века. В течении столетий развития человечества люди наблюдали явление взаимного притяжения тел и измеряли его величину; они пытались поставить это явление себе на службу, превзойти его влияние, и наконец, уже в самое последнее время рассчитывать его с чрезвычайной точностью во время первых шагов вглубь Вселенной. Необозримая сложность окружающих нас тел обусловлена прежде всего такой многоступенчатой структурой, конечные элементы которой - элементарные частицы - обладают сравнительно небольшим числом видов взаимодействия. Но эти виды взаимодействия резко отличаются по своей силе. Частицы, образующие атомные ядра, связаны между собой самыми могучими из всех известных нам сил; для того чтобы отделить эти частицы друг от друга, необходимо затратить колоссальное количество энергии. Электроны в атоме связаны с ядром электромагнитными силами; достаточно сообщить им весьма скромную энергию, (как правило достаточно энергии химической реакции) как электроны уже отделяются от ядра. Если говорить об элементарных частицах и атомах, то для них самым слабым взаимодействием является гравитационное взаимодействие. При сопоставлении с взаимодействием элементарных частиц гравитационные силы настолько слабы, что это трудно себе представить. Тем не менее они и только они полностью регулируют движение небесных тел. Это происходит потому, что тяготение сочетает в себе две особенности, из-за которых его действие усиливается, когда мы переходим к крупным телам. В отличие от атомного взаимодействия, силы гравитационного притяжения ощутимы и на больших удалениях от создающих их тел. Кроме того гравитационные силы - это всегда силы притяжения, то есть тела всегда притягиваются друг к другу.

Развитие теории гравитации произошло в самом начале становления современной науки на примере взаимодействия небесных тел. Задачу облегчило то, что небесные тела движутся в вакууме мирового пространства без побочного влияния других сил. Блестящие астрономы - Галилей и Кеплер - подготовили своими трудами почву для дальнейших открытий в этой области. В дальнейшем великий Ньютон сумел придумать целостную теорию и придать ей математическую форму. Среди всех сил, которые существуют в природе, сила тяготения отличается прежде всего тем, что проявляется повсюду. Все тела обладают массой, которая определяется как отношение силы, приложенной к телу, к ускорению, которое приобретает под действием этой силы тело. Сила притяжения, действующая между любыми двумя телами, зависит от масс обоих тел; она пропорциональна произведению масс рассматриваемых тел. Кроме того, сила тяготения характеризуется тем, что она подчиняется закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. Другие силы могут зависеть от расстояния совсем иначе; известно немало таких сил.

Один аспект всемирного тяготения - удивительная двойственная роль, которую играет масса, - послужила краеугольным камнем для построения общей теории относительности. Согласно второму закону Ньютона масса является характеристикой всякого тела, которая показывает,

как будет вести себя тело, когда к нему прикладывается сила, независимо от того, будет ли это сила тяжести или какая - то другая сила. Так как все тела, по Ньютону, в качестве отклика на внешнюю силу ускоряются (изменяют свою скорость), масса тела определяет, какое ускорение испытывает тело, когда к нему приложена заданная сила. Если одна и та же сила прикладывается к велосипеду и автомобилю, каждый из них достигнет определенной скорости в разное время. Но по отношению к тяготению масса играет еще и другую роль, совсем не похожую на ту, какую она играла как отношение силы к ускорению: масса является источником взаимного притяжения тел; если взять два тела и посмотреть, с какой силой они действуют на третье тело, расположенного на одном и том же расстоянии сначала от одного, а затем от другого тела, мы обнаружим, что отношение этих сил равно отношению первых двух масс. Фактически оказывается, что эта сила пропорциональна массе источника. Сходным образом, согласно третьему закону Ньютона, силы притяжения, которые испытывают два различных тела под действием одного и того же источника притяжения (на одном и том же расстоянии от него), пропорциональны отношению масс этих тел. В инженерных науках и повседневной жизни про силу, с которой тело притягивается к земле, говорят как о весе тела. Итак, масса входит в связь, которая существует между силой и ускорением; с другой стороны, масса определяет величину силы притяжения. Такая двойственная роль массы приводит к тому, что ускорение различных тел в одном и том же гравитационном поле оказывается одинаковым. Действительно, возьмем два различных тела с массами m и M соответственно. Пусть оба они свободно падают на Землю. Отношение сил притяжения, испытываемых этими телами, равно отношению масс этих тел m/M . Однако ускорение, приобретаемое ими, оказывается одинаковым. Таким образом, ускорение, приобретаемое телами в поле тяготения, оказывается для всех тел в одном и том же поле тяготения одинаковым и совсем не зависит от конкретных свойств падающих тел. Это ускорение зависит только от масс тел, создающих поле тяготения, и от расположения этих тел в пространстве. Двойственная роль массы и вытекающее из нее равенство ускорения всех тел в одном и том же гравитационном поле известно под названием принципа эквивалентности. Это название имеет историческое происхождение, подчеркивающее то обстоятельство, что эффекты тяготения и инерции до известной степени эквивалентны.

На поверхности Земли ускорение силы тяжести, грубо говоря, равно 10 м/сек^2 . Скорость свободно падающего тела, если не учитывать сопротивление воздуха при падении, возрастает на 10 м/сек . Каждую секунду. Например, если тело начнет свободно падать из состояния покоя, то к концу третьей секунды его скорость будет равна 30 м/сек . Обычно ускорение свободного падения обозначается буквой g . Из-за того, что форма Земли не строго совпадает с шаром, величина g на Земле не везде одинакова; она больше у полюсов, чем на экваторе, и меньше на вершинах больших гор, чем в долинах. Если величина g определяется с достаточной точностью, то на ней сказывается даже геологическая структура. Этим объясняется то, что в геологические методы поисков нефти и других полезных ископаемых входит также точное определение величины g . То, что в данном месте все тела испытывают одинаковое ускорение, - характерная особенность тяготения; такими свойствами никакие другие силы не обладают. И хотя Ньютону не оставалось ничего лучшего, как описать этот факт, он понимал всеобщность и единство ускорения тяготения. На долю немецкого физика - теоретика Альберта Эйнштейна (1870 - 1955) выпала честь выяснить принцип, на основе которого можно было объяснить это свойство тяготения, принцип эквивалентности. Эйнштейну также принадлежат основы современного понимания природы пространства и времени.

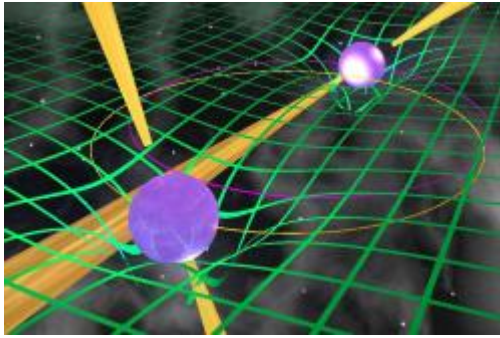


Уже со времен Ньютона считалось, что все системы отсчета представляют собой набор жестких стержней или каких-то других предметов, позволяющих устанавливать положение тел в пространстве. Конечно, в каждой системе отсчета такие тела выбирались по-своему. Вместе с тем принималось, что у всех наблюдателей одно и то же время. Это предположение казалось интуитивно настолько очевидным, что специально не оговаривалось. В повседневной практике на Земле это предположение подтверждается всем нашим опытом. Но Эйнштейну удалось показать, что сравнения показаний часов, если принимать во внимание их относительное движение, не требует особого внимания лишь в том случае, когда относительные скорости часов значительно меньше, чем скорость распространения света в вакууме. Итак, первым результатом анализа Эйнштейна явилось установление относительности одновременности: два события, происходящие на достаточном удалении друг от друга, могут оказаться для одного наблюдателя одновременными, а для наблюдателя, движущегося относительно него, происходящими в разные моменты времени. Поэтому предположение о едином времени не может быть оправданно: невозможно указать определенную процедуру, позволяющую любому наблюдателю установить такое универсальное время независимо от того движения, в котором он участвует. В системе отсчета должны присутствовать еще и часы, движущиеся вместе с наблюдателем и синхронизированные с часами наблюдателя.

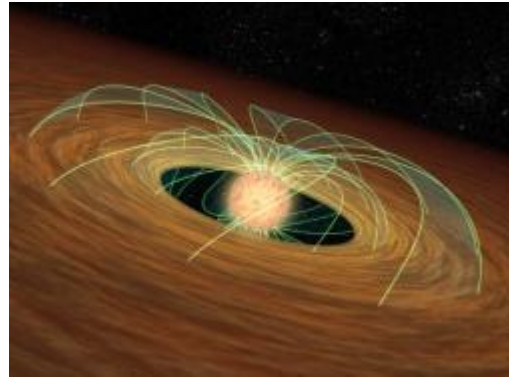
Следующий шаг, сделанный Эйнштейном, состоял в установлении новых взаимоотношений результатов измерений расстояний и времени в двух различных инерциальных системах отсчета. Специальная теория относительности вместо "абсолютных длин" и "абсолютного времени" явила на свет иную "абсолютную величину", которую принято называть инвариантным пространственно-временным интервалом. Для двух заданных событий, происходящих на некотором удалении друг от друга, пространственное расстояние между ними не является абсолютной (т.е. не зависящим от системы отсчета) величиной даже в Ньютоновской схеме, если между наступлением этих событий есть некоторый интервал времени. Действительно, если два события происходят не одновременно, наблюдатель, движущийся с некоторой системой отсчета в одном направлении и оказавшийся в той точке, где наступило первое событие, может за промежуток времени, разделяющий два эти события, оказаться в том месте, где наступает второе событие; для этого наблюдателя оба события будут происходить в одном и том же месте пространства, хотя для наблюдателя, движущегося в противоположном направлении, они могут показаться происшедшими на значительном удалении друг от друга. 4. Теория относительности и гравитация. Чем глубже уходят научные исследования в конечные составляющие вещества и чем меньше остается число частиц и сил, действующих между ними, тем настойчивее становятся требования исчерпывающего понимания действия и структуры каждой компоненты материи. Именно по этой причине, когда Эйнштейн и другие физики убедились в том, что специальная теория относительности пришла на смену ньютоновской физике, они занялись снова фундаментальными свойствами частиц и силовых полей. Наиболее важным объектом, требующим пересмотра, была гравитация.

Но почему бы несоответствие между относительностью времени и законом тяготения Ньютона не разрешить столь же просто, как в электродинамике? Следовало бы ввести представление о гравитационном поле, которое распространялось бы примерно так же, как электрическое и магнитное поля, и которое оказалось бы посредником при гравитационном взаимодействии тел, в согласии с представлениями теории относительности. Это гравитационное взаимодействие сводилось бы к ньютоновскому закону тяготения, когда относительные скорости рассматриваемых тел были бы малы по сравнению со скоростью света. Эйнштейн попытался построить релятивистскую теорию тяготения на этой основе, но одно обстоятельство не позволило ему осуществить это намерение: никто ничего не знал о распространении гравитационного взаимодействия с большой скоростью, имелась лишь некоторая информация относительно эффектов, связанных с большими скоростями движения источников гравитационного поля - масс. Влияние больших скоростей на массы непохоже на влияние больших скоростей на заряды. Если электрический заряд тела остается одним и тем же для всех наблюдателей, масса тел зависит от их скорости относительно наблюдателя. Чем выше скорость, тем больше наблюдаемая масса. Для заданного тела наименьшая масса будет определена наблюдателем, относительно которого тело покоится. Это значение массы называется массой покоя тела. Для всех остальных наблюдателей масса окажется больше массы покоя на величину, равную кинетической энергии тела, деленной на c . Значение массы стало бы бесконечным в той системе отсчета, в которой скорость тела стала бы равной скорости света. О такой системе отсчета можно говорить лишь условно. Поскольку величина источника тяготения столь существенно зависит от системы отсчета, в которой определяется ее значение, порождаемое массой поле должно быть более сложным, чем электромагнитное поле. Эйнштейн заключил поэтому, что гравитационное поле, по-видимому, представляет собой так называемое тензорное поле, описываемое большим числом компонент, чем

электромагнитное поле.



В качестве



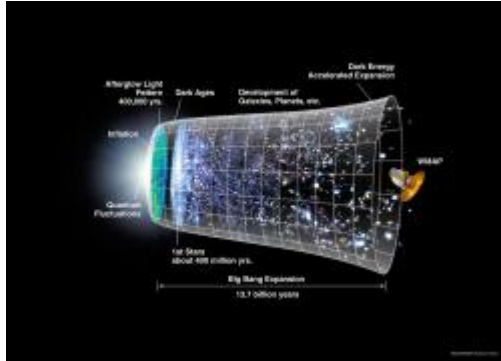
следующего исходного принципа Эйнштейн постулировал, что законы гравитационного поля должны получаться на основе математической процедуры, аналогичной процедуре, приводящей к законам электромагнитной теории; законы гравитационного поля, получаемые таким способом, очевидно, должны быть сходны по форме с законами электромагнетизма. Но даже принимая во внимание все эти соображения, Эйнштейн обнаружил, что он может построить несколько различных теорий, которые в равной степени удовлетворяют всем требованиям. Нужна была иная точка зрения, чтобы однозначно прийти к релятивистской теории тяготения. Эйнштейн нашел такую новую точку зрения в принципе эквивалентности, согласно которому ускорение, приобретаемое телом в поле сил тяготения, не зависит от характеристик этого тела.

В специальной теории относительности, как и в ньютоновской физике, постулируется существование инерциальных систем отсчета т.е. систем относительно которых тела движутся без ускорения, когда на них не действуют внешние силы. Экспериментальное нахождение такой системы зависит от того, сможем ли мы поставить пробные тела в такие условия, когда на них не действуют никакие внешние силы, причем должно быть экспериментальное подтверждение отсутствия таких сил. Но если наличие, например, электрического (или любого другого силового) поля может быть обнаружено по различию в действии, которые эти поля оказывают на различные пробные частицы, то все пробные частицы, помещенные в одно и то же поле тяготения, приобретают одно и то же ускорение.

Однако даже при наличии гравитационного поля существует некоторый класс систем отсчета, который может быть выделен чисто локальными экспериментами. Так как все гравитационные ускорения в данной точке (малой области) у всех тел одинаковы как по величине, так и по направлению, все они окажутся равными нулю по отношению к системе отсчета, которая ускоряется вместе с другими физическими объектами, которые находятся под действием только силы тяготения. Такая система отсчета называется свободно падающая система отсчета. Такую систему нельзя неограниченно продолжить на все пространство и на все моменты времени. Она может быть однозначно определена лишь в окрестности мировой точки, в ограниченной области пространства и для ограниченного промежутка времени. В этом смысле свободно падающие системы отсчета можно назвать локальными системами отсчета. По отношению свободно падающим системам отсчета материальные тела, на которые не действуют никакие силы, кроме сил тяготения, не испытывают ускорения.

Свободно падающие системы отсчета в отсутствие гравитационных полей тождественны с инерциальными системами отсчета; в этом случае они неограниченно продолжимы. Но такое неограниченное распространение систем становится невозможным, когда появляются гравитационные поля. То, что свободно падающие системы вообще существуют хотя бы только как локальные системы отсчета, есть прямое следствие принципа эквивалентности, которому подчиняются все гравитационные эффекты. Но тот же самый принцип ответственен за то, что никакими локальными процедурами невозможно построить инерциальные системы отсчета при наличии гравитационных полей. Эйнштейн рассматривал принцип эквивалентности как самое фундаментальное свойство тяготения. Он понял, что от представления о неограниченно продолжимых инерциальных системах отсчета следует отказаться пользу локальных свободно падающих систем отсчета; и лишь поступив таким образом, можно принять принцип эквивалентности как основную часть фундамента физики. Такой подход дал возможность физикам глубже заглянуть в природу тяготения. Наличие гравитационных полей оказывается равносильным невозможности распространения в пространстве и времени локальной свободно

падающей системы отсчета; таким образом, при изучении гравитационных полей следует фокусировать внимание не столько на локальной величине поля, сколько на неоднородности гравитационных полей. Ценность такого подхода, который в конечном счете отрицает универсальность существования инерциальных систем отсчета, состоит в том, что он ясно показывает следующее: нет никаких оснований принимать без размышлений возможность построения инерциальных систем отсчета, несмотря на то, что такие системы использовались на протяжении нескольких столетий.



В теории тяготения Ньютона ускорение тяготения, вызываемое заданной большой массой, пропорционально этой массе и обратно пропорционально квадрату расстояния от этой массы. Тот же самый закон можно сформулировать немного иначе, но при этом мы сможем выйти на релятивистский закон тяготения. Эта иная формулировка опирается на представление о гравитационном поле как о чем-то таком, что впечатано в окрестность большой гравитирующей массы. Поле можно полностью описать, задавая в каждой точке пространства вектор, величина и направление которого соответствуют тому гравитационному ускорению, которое приобретает любое пробное тело, помещенное в эту точку. Можно описать поле тяготения графически, проводя в нем кривые, касательная к которым в каждой точке пространства совпадает с направлением локального поля тяготения (ускорения); эти кривые проводятся с плотностью (определенное число кривых на единицу площади поперечного сечения), равной величине локального поля. Если рассматривается одна большая масса, такие кривые - их называют силовыми линиями - оказываются прямыми линиями; эти прямые указывают прямо на тело, создающее поле тяготения.

Обратно пропорциональная зависимость от квадрата расстояния выражается графически так: все силовые линии начинаются на бесконечности и заканчиваются на больших массах. Если плотность силовых линий равна величине ускорения, число линий, проходящих через сферическую поверхность, центр которой расположен на большой массе, как раз равно плотности силовых линий, умноженной на площадь сферической поверхности радиуса r ; площадь сферической поверхности пропорциональна квадрату его радиуса. В общем случае ньютоновский закон обратной зависимости от квадрата расстояния может быть приведен в такой форме, которая в равной степени пригодна для источника тяготения в виде одной большой массы и для произвольного распределения масс: все силовые линии гравитационного поля начинаются на бесконечности и оканчиваются на самих массах. Полное число силовых линий, оканчивающихся в некоторой области, содержащей массы, пропорционально полной массе, заключенной в этой области. Кроме того, гравитационное поле - поле консервативное: силовые линии не могут принимать форму замкнутых кривых, а перемещение пробного тела вдоль замкнутой кривой не может привести ни к выигрышу, ни к потере энергии.

В релятивистской теории гравитации роль источников отводится комбинациям массы и импульса (импульс выступает связующим звеном между состоянием одного и того же объекта в разных четырехмерных или, лоренцевых, системах отсчета). Неоднородности релятивистского поля тяготения описываются тензором кривизны. Тензор представляет собой математический объект, полученный обобщением представления о векторах. В многообразии, описываемом с помощью координат, тензорам можно сопоставить компоненты, полностью определяющие тензор. Релятивистская теория связывает тензор кривизны с тензором, описывающим поведение источников тяготения. Эти тензоры пропорциональны друг другу. Коэффициент пропорциональности определяется из требования: закон тяготения в тензорной форме должен сводиться к ньютоновскому закону тяготения для слабых гравитационных полей и при малых скоростях тел; этот коэффициент пропорциональности с точностью до мировых констант равен постоянной тяготения Ньютона. Этим шагом Эйнштейн завершил построение теории тяготения, называемой иначе общей теорией относительности.