

Комментарии к лекциям по физике

Тема: Силы инерции и тяготение. Принцип эквивалентности

Неинерциальные системы отсчета и силы инерции

Для описания движения тел в неинерциальных системах отсчета никакие новые физические законы не нужны. Переход к неинерциальной системе по сути дела представляет собой простой (кинематический) пересчет от одной системы отсчета к другой. В уравнении второго закона Ньютона, записанного в инерциальной системе, можно выразить «абсолютное» ускорение (ускорение относительно инерциальной системы отсчета) через относительное и переносное (в случае вращающейся системы — еще и кориолисово ускорение). Оставляя в левой части уравнения только относительное ускорение, придают этому уравнению вид второго закона Ньютона с дополнительными членами в правой части. Эти дополнительные члены можно трактовать как силы инерции, складывающиеся с теми «настоящими» или «физическими» силами, которые характеризуют действие других тел на рассматриваемое тело. Интегрирование дифференциального уравнения движения с включенными в него силами инерции позволяет рассчитать движение тела относительно неинерциальной системы отсчета.

Многочисленные дискуссии в литературе по поводу сил инерции («фиктивные» это или «реальные» силы), несмотря на их острый характер, по своей сути чисто терминологические. Если определять силу как количественную меру действия других тел на данное тело, то в этом смысле сила инерции не является «настоящей» силой, так как мы не можем указать ее источник, т.е. тело, со стороны которого она действует. Поэтому к силам инерции неприменим третий закон Ньютона. К тому же эта сила исчезает при переходе к другой (инерциальной) системе отсчета, чего с «настоящими» силами не бывает. В англоязычной литературе силы инерции иногда называют псевдосилами.

Но если трактовать силу как причину ускорения тела, то в этом отношении силы инерции «ничем не хуже» всех других сил. Неприменимость третьего закона к силам инерции принципиального значения не имеет, поскольку для любой физической системы силы инерции всегда будут внешними силами (третий закон важен лишь для внутренних сил, действующих между входящими в систему телами).

Вопрос о происхождении (или об источнике) сил инерции также не имеет самостоятельного значения, так как по существу сводится к вопросу о том, почему второй закон Ньютона справедлив только в инерциальных системах отсчета. Последний же вопрос при изучении основ динамики обычно не поднимается (дескать, так устроен мир, о чем свидетельствуют все известные экспериментальные факты), хотя безусловно очень важен в познавательном отношении. Попытки выяснения физической причины, выделяющей инерциальные системы отсчета среди прочих (в частности, так называемый принцип Маха), послужили для Эйнштейна стимулом к созданию общей теории относительности (релятивистской теории тяготения).

Силы инерции и силы тяготения

Важная особенность сил инерции заключается в том, что для любого тела (независимо от его формы, размеров, химического состава, электрического заряда, магнитного момента и любых других свойств) силы инерции всегда пропорциональны инертной массе тела. Это свойство непосредственно следует из определения сил инерции. Поэтому все тела под действием только сил инерции приобретают одинаковые ускорения.

Это свойство роднит силы инерции с силами тяготения. Использование неинерциальных систем отсчета позволяет непринужденно решать многие задачи, к которым трудно подступиться в рамках инерциальных систем. Неинерциальные системы отсчета могут использоваться не только в классической (ньютоновской) механике, но в равной мере и в задачах релятивистской механики (вопреки часто встречающимся утверждениям).

Земное тяготение известно с глубокой древности, но понимание роли тяготения в наблюдаемых движениях небесных тел («всемирное» тяготение) пришло лишь в эпоху Кеплера и Ньютона. Даже Галилей, первым пришедший к пониманию того, что равномерное прямолинейное движение представляет собой естественное состояние тела, ограничил применимость закона инерции только земными условиями. Галилей не придавал значения законам Кеплера, продолжая считать круговые движения небесных тел «совершенными», т.е. рассматривал их как естественные движения, не нуждающиеся в динамическом объяснении.

Количественные закономерности всемирного тяготения были впервые установлены Ньютоном на основе открытых Кеплером кинематических законов движения планет солнечной системы. Центральный характер силы тяготения следует из закона площадей (второго закона Кеплера). Обратная пропорциональность силы тяготения квадрату расстояния между телами следует из того, что движение планеты происходит по эллипсу (первый закон Кеплера). Более простое доказательство зависимости силы тяготения от расстояния ($F \sim 1/r^2$) может быть основано на третьем законе Кеплера для круговых орбит (квадраты периодов обращения пропорциональны кубам радиусов орбит). Вся совокупность астрономических наблюдений свидетельствует о том, что показатель степени в законе тяготения равен 2 с очень высокой точностью, что отражает евклидову природу трехмерного физического пространства: в евклидовой геометрии поверхность сферы в точности пропорциональна квадрату ее радиуса.

Связь всемирного тяготения с земной силой тяжести также установлена Ньютоном путем сравнения ускорения Луны с ускорением свободного падения тел на поверхности Земли. В этой проблеме объяснения земной тяжести всемирным тяготением существенным моментом является математическое доказательство того, что тело со сферически симметричным распределением масс проявляет себя в гравитационных взаимодействиях так, как если бы вся его масса была сосредоточена в геометрическом центре (для доказательства того, что ускорение свободного падения g равно GM/R^2 , Ньютону пришлось изобрести интегральное исчисление). Гравитационную постоянную (коэффициент пропорциональности G в законе $F = GmM/r^2$) невозможно определить из астрономических наблюдений, так как G входит во все формулы вместе с массой M источника гравитационного поля. Лабораторные опыты по определению гравитационной постоянной и тем самым по

определению массы Земли («взвешивание Земли») и других небесных тел впервые были выполнены Кэвендишем.

Пропорциональность инертной и гравитационной масс

Гравитационное притяжение между материальными телами пропорционально массам взаимодействующих тел. В законе всемирного тяготения $F = GmM/r^2$ масса выступает как количественная характеристика способности тела к гравитационным взаимодействиям, подобно тому, как в законе Кулона $F = qQ/r^2$ электрический заряд тела выступает как мера способности тела к электростатическим взаимодействиям. В этом смысле массу, входящую в закон тяготения (в отличие от инертной массы, входящей во второй закон Ньютона), можно назвать *гравитационным зарядом* (гравитационной массой). Иначе говоря, эти величины в классической физике характеризуют разные свойства материи: инертная масса служит мерой способности тела приобретать ускорение под действием силы (мерой инертности), а гравитационная масса — мерой способности тела к гравитационным взаимодействиям.

Принципиально важное значение имеет связанный с тяготением физический закон (открытый еще Галилеем), согласно которому свободное падение любых тел в одном и том же гравитационном поле происходит с одинаковым ускорением. Другими словами, движение тела под действием одного лишь тяготения совершенно не зависит от свойств тела, т.е. столь же универсально, как и свободное движение. В той же мере универсально и любое сочетание свободного движения и свободного падения, т.е. движение, при котором ускорение создается одним лишь тяготением (например, движение планет вокруг Солнца).

Из закона Галилея (вместе со вторым законом Ньютона) следует, что действующая на любое тело сила тяготения пропорциональна его инертной массе. Это утверждение известно как пропорциональность инертной и гравитационной масс всех тел. Для экспериментальной проверки этого закона после Галилея неоднократно ставились все более точные опыты (Ньютон, Бессель, Этвеш, Дикке) с целью ответить на вопрос: зависит ли гравитационное ускорение тела от его природы? В недавних опытах Дикке было установлено, что солнечное тяготение сообщает телам из алюминия и золота ускорения, отличающиеся не более чем на $3 \cdot 10^{-11}$. В 70-х годах Брагинским и Пановым точность опытов была увеличена еще примерно в 40 раз, так что в настоящее время пропорциональность инертной и гравитационной масс установлена с относительной точностью, достигающей 10^{-12} .

Принцип эквивалентности

Для классической физики строгая пропорциональность инертной и гравитационной масс не имеет под собой физической причины, т. е. не связана с логической структурой теории, а является скорее случайным совпадением. Ньютоновская теория не пострадала бы в случае, если эта пропорциональность была бы лишь грубым приближением к действительности. Эйнштейн счел неудовлетворительным, что столь универсальный факт пропорциональности инертной и гравитационной масс, установленный на опыте с чрезвычайно высокой точностью, оставался необъясненным и не находил своего места в фундаменте наших представлений о природе.

В результате им был сформулирован *принцип эквивалентности*, связывающий воедино инерцию и тяготение. В основанной на этом принципе релятивистской теории тяготения (общей теории относительности) равенство инертной и гравитационной масс имеет принципиальное значение и изначально заложено в основу теории. Согласно Эйнштейну, в совпадении инертной и гравитационной масс нет ничего удивительного или случайного, так как он предположил, что в действительности инертная и гравитационная массы представляют собой одну и ту же физическую величину.

Для формулировки принципа эквивалентности удобно, следуя Эйнштейну, рассматривать идеализированные мысленные эксперименты в закрытой лаборатории («кабине лифта»). В случае свободного падения такого «лифта» в гравитационном поле мы получаем реализацию неинерциальной системы отсчета, в которой все тела подвержены действию сил инерции. Но гравитационное поле всем телам в этой лаборатории сообщает в точности такое же ускорение, как и самой лаборатории. Другими словами, в такой свободно падающей системе отсчета движения всех свободных тел (движения «по инерции») будут прямолинейными и равномерными, хотя для внешнего наблюдателя эти движения представляются ускоренными.

Невозможность с помощью механических опытов в закрытой лаборатории выяснить, является ли связанная с ней система отсчета инерциальной, или же она находится в свободном падении в гравитационном поле, следует из пропорциональности инертной и гравитационной масс. Эйнштейн распространил это утверждение на всю физику: не только механические движения, но и все физические явления в свободно падающей лаборатории будут происходить так же точно, как и в инерциальной системе отсчета. Принципиальная невозможность отличить одно явление от другого (инерцию от тяготения) означает, что мы имеем дело с одним и тем же явлением, т.е. свободное падение и свободное движение (движение «по инерции») — это одно и то же.

Принцип эквивалентности и невесомость

Примером практической реализации свободно падающей лаборатории (эйнштейновского «лифта») может служить космический корабль или станция в пассивном орбитальном полете. Мы говорим, что все тела на такой станции находятся в «состоянии невесомости», имея в виду, что все явления там происходят так, как если бы это была инерциальная система отсчета, и никаких гравитационных полей там не было. Сторонний наблюдатель может интерпретировать данную ситуацию как полную компенсацию сил тяготения, действующих на все тела в свободно падающей лаборатории, силами инерции, которые, как и силы тяготения, благодаря своей замечательной универсальности всем телам в лаборатории сообщают одинаковые ускорения, противоположные гравитационным ускорениям. Разумеется, из-за неоднородности поля тяготения такая компенсация сил тяготения силами инерции возможна только в ограниченной области пространства (локальный характер принципа эквивалентности).

Чтобы испытать состояние невесомости, необязательно становиться космонавтом и совершать полет на орбитальной станции. Наша планета по существу представляет собой космический корабль, находящийся в свободном падении под действием гравитационных полей Солнца и других небесных тел. Поэтому все мы на

Земле находимся в состоянии невесомости по отношению к солнечному тяготению и тяготению других небесных тел (кроме Земли).

Неоднородность полей тяготения Луны и Солнца приводит к неполной компенсации сил тяготения силами инерции, действующими на все тела в связанной с Землей свободно падающей системе отсчета. Эта неполная компенсация отражает локальный характер принципа эквивалентности и проявляется в хорошо знакомых приливных силах.

Релятивистская теория тяготения

Соединение релятивистских представлений о пространстве и времени с принципом эквивалентности приводит к релятивистской теории тяготения (общей теории относительности). Вследствие универсальности тяготения исчезают причины для его интерпретации как силового поля. То, что в классической физике рассматривалось как состояние свободного падения (как ускоренное движение в поле тяготения), в общей теории относительности трактуется как состояние свободного движения («движения по инерции») в искривленном пространстве-времени. Свободное движение тела — это наиболее простое движение, происходящее в отсутствие всяких воздействий со стороны других тел и силовых полей. Характеристики такого движения определяются только геометрическими свойствами пространства-времени: мировые линии свободного движения (аналог «прямых» линий) представляют собой геодезические линии геометрии пространства-времени. В отсутствие массивных тел это действительно прямые линии в плоском псевдоевклидовом пространстве-времени.

Согласно представлениям ньютоновской физики, присутствие материальных тел проявляется в создаваемом ими поле тяготения. Действуя на свободные тела, поле тяготения вызывает отклонения в их движении от прямолинейного равномерного движения в евклидовом физическом пространстве. Согласно общей теории относительности, материальные тела приводят не к появлению поля тяготения как некоторого физического силового поля, а к локальным отклонениям геометрии реального пространства-времени от псевдоевклидовой геометрии. (Плоское псевдоевклидово пространство-время частной теории относительности приближенно соответствует физической реальности в отсутствие массивных тел.)

Таким образом, в общей теории относительности характеристики свободного движения пробного тела при наличии материальных тел обусловлены не создаваемым этими телами физическим полем тяготения, а пространственно-временными свойствами реального мира. Влияние материи на геометрию проявляется в том, что мировые линии свободных частиц (аналог «прямых») представляют собой геодезические линии в искривленном пространстве-времени. Неевклидовость мира обнаруживается прежде всего в движении, т.е. не в пространственной, а в пространственно-временной геометрии.

Геометрические свойства пространства-времени в каждой точке характеризуются метрическим тензором. Уравнения тяготения Эйнштейна связывают геометрические характеристики пространства-времени с тензором энергии-импульса физической среды, играющим в релятивистской теории роль источника явлений тяготения (т.е. искривления пространства-времени). Тензор энергии-импульса определяется массами тел и их скоростями, а также всеми другими видами энергии в рас-

смаатриваемой системе (в соответствии с релятивистским соотношением $E = mc^2$).

Образно говоря, гениальность Ньютона проявилась в том, что он увидел Луну свободно падающей на Землю, хотя всякий видит совсем иное. И нужно было обладать гениальностью Эйнштейна, чтобы увидеть, что движение Луны в некотором смысле происходит по «прямой».

Эйнштейновская и ньютоновская теории тяготения

Ни одна физическая теория не подвергалась таким испытаниям, проверкам и перепроверкам (почти с непостижимой степенью точности, главным образом в астрономии и небесной механике), как теория тяготения Ньютона за первые два с половиной века своего существования. Но это не убергло теорию от опровержения в результате создания релятивистской теории тяготения. Релятивистская теория лучше объясняет несколько тонких эффектов, лежащих на грани экспериментальных возможностей (прецессия перигелия орбиты Меркурия, гравитационное красное смещение спектральных линий, отклонение световых лучей при прохождении вблизи Солнца, задержка радиосигналов при прохождении вблизи Солнца, уменьшение периода обращения компонент двойной звездной системы из-за излучения гравитационных волн), и дает более глубокое понимание явления тяготения в целом. Но в той области, где ньютоновская теория выдержала экспериментальную проверку, любая приходящая ей на смену теория тяготения (в том числе эйнштейновская теория тяготения) должна приводить к тем же результатам (принцип соответствия): уравнения релятивистской теории тяготения в пределе переходят в уравнения классической динамики и ньютоновской теории тяготения.

Можно показать, что ньютоновская теория хорошо описывает наблюдательные факты, пока скорости, приобретаемые телами под влиянием тяготения, малы по сравнению с скоростью света, т.е. пока гравитационная энергия тела составляет малую часть полной энергии (включающей энергию покоя). В таком случае говорят о слабых гравитационных полях. В солнечной системе мы имеем дело только со слабым тяготением. Поэтому и в наши дни все расчеты в небесной механике и космической динамике выполняются на основе ньютоновской теории тяготения.

Для определения условий, ограничивающих применимость ньютоновской теории тяготения, можно рассмотреть падение малого пробного тела из бесконечности в гравитационном поле большого тела со сферически симметричным распределением масс. Скорость, приобретаемая пробным телом на расстоянии R от тела массы M определяется (на основании закона всемирного тяготения и закона сохранения энергии) выражением $v = \sqrt{2GM/R}$. Расстояние R , на котором вычисляемая по этой формуле скорость становится равной скорости света, называется *гравитационным радиусом* тела массы M : $R = 2GM/c^2$. Гравитационные радиусы обычных астрофизических объектов ничтожно малы по сравнению с их действительными размерами: гравитационный радиус Земли ~ 1 см, Солнца ~ 3 км. Если тело сжать до размеров гравитационного радиуса, то никакие силы не смогут удержать его от дальнейшего сжатия под действием гравитации. Такой релятивистский гравитационный коллапс может происходить с достаточно массивными звездами в конце их эволюции.