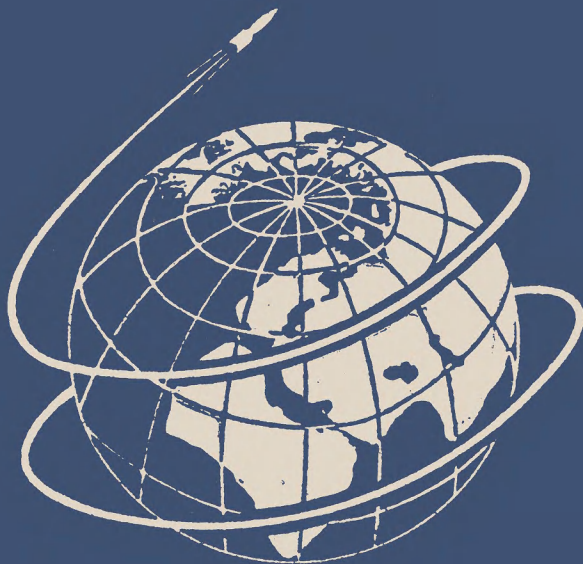


Л. Э. ГУРЕВИЧ



Теория
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Серия VIII №18

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

МОСКВА • 1957

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Доктор физико-математических наук
профессор
Л. Э. ГУРЕВИЧ

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

*(Основные понятия и выводы частной теории
относительности)*

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва



1957

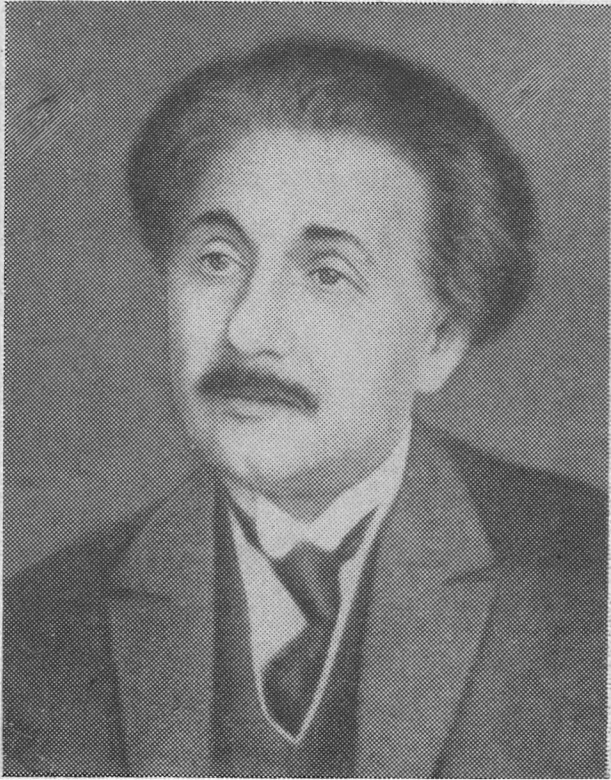
В этой брошюре излагаются основные понятия и выводы теории относительности.

Вначале автор знакомит читателя с развитием представлений о пространстве, времени и движении. Далее рассматривается основное положение теории относительности о том, что законы механических и электромагнитных явлений одинаковы во всех инерциальных системах.

Во II разделе, посвященном выводам теории относительности, освещаются в популярной и увлекательной форме такие вопросы, как, например, „Путешествие во времени“ и „Путешествие к звездам“, „Относительность траекторий“, „Эффект Доплера“.

В заключительной части автор рассказывает о некоторых применениях теории относительности в физике.

Трудности популярного изложения теории относительности общеизвестны. Автор—крупнейший специалист по теоретической физике—стремится преодолеть эти трудности и познакомить широкие слои читателей с одной из самых замечательных научных теорий современности.



A. Einstein

1. ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОСТРАНСТВЕ, ВРЕМЕНИ И ДВИЖЕНИИ

Относительность движения в классической механике

В основе современной физики лежат определенные представления о пространстве, времени и движении. Эти представления не возникли сразу в теперешней форме, а развивались на протяжении тысячелетий. Уже древнегреческая наука создала несколько различных теорий пространства. Аристотель представлял себе мир в виде шара совсем небольших размеров; его радиус не превышал сотни тысяч километров, а Земля находилась в центре этого шара. Окружающее Землю пространство Аристотель считал неоднородным и точки, находившиеся на разных расстояниях от нее, различными по своим свойствам. Каждую из них можно было зафиксировать независимо от того, находилось ли в ней какое-либо тело или нет. Перемещение тела от одной точки к другой представляло собой его абсолютное движение.

Прошли века. Коперник лишил Землю ее центрального положения, превратив в маленького спутника Солнца. Джордано Бруно ввел в науку идею о том, что и Солнце не является центром Вселенной, но представляет лишь один из бесчисленных миров. После этого в науке утвердилось представление о том, что пространство неограниченно и однородно и что точки пространства можно фиксировать только по отношению к находящимся в нем телам. Хотя в наше время общая теория относительности снова изменила эти представления, показав их неправильность, они сыграли в истории науки важную роль.

Основываясь на этих новых представлениях о пространстве, Галилей установил опытные законы движения тел и сформулировал принцип относительности движения. Он заключается в том, что, находясь внутри равномерно и прямолинейно движущейся системы (например, внутри парохода), невозможно определить ее скорость, если не наблюдать непосредственно ее перемещение относительно окружающих систем, а изучать лишь движение тел внутри этой системы (внутри парохода).

Этот вывод следует из того фундаментального факта, что законы движения тел, находящихся внутри равномерно и прямолинейно движущейся системы, не зависят от скорости ее движения.

Коротко говоря, равномерное и прямолинейное движение тела или систем тел можно обнаружить лишь по отношению к другим телам или системам тел, например по изменению расстояний.

Таким образом, в результате длительного развития физика опытным путем дошла до понимания того факта, что движение тела (по крайней мере, равномерное и прямолинейное движение) не есть его переход от одной фиксированной точки пустого пространства к другой фиксированной точке, а есть перемещение его по отношению к другим телам, эмпирически обнаруживаемое по изменению его расстояний до других тел. Доказательством этого являлось то, что эмпирическое обнаружение движения было возможно только по изменению расстояний. Это понятие о движении представляло значительный прогресс по сравнению с физикой Аристотеля, однако, как мы сейчас увидим, в дальнейшем ему пришлось встретиться с некоторыми трудностями и даже отступить под напором фактов.

Современная классическая физика начинается с Ньютона. Известно, что Ньютон установил общий закон движения, который в упрощенной форме можно сформулировать так: всякое ускорение в движении тела создается действием силы.

Однако с этим законом дело обстоит совсем не просто. На Земле существует целый ряд ускорений, не создаваемых никакими силами:

1. Маятник Фуко, подвешенный так, что плоскость качаний может поворачиваться вокруг вертикали, испытывает два ускорения: ускорение в колебательном движении, вызванное силой тяжести, и другое ускорение, заключающееся в повороте плоскости качаний на 360° в течение суток. Это второе ускорение не создается никакой силой и представляет собой лишь следствие вращения Земли. Оно происходит от того, что маятник стремится по инерции сохранить неизменной плоскость качаний.

2. Поезда, идущие в северное полушарие, стирают быстрее правый рельс, а реки, текущие в северном полушарии, подмывают сильнее правый берег. Это связано с так называемым кориолисовым ускорением, обусловленным также вращением Земли, а не какой-либо внешней силой.

Наличие на Земле таких ускорений позволило бы нам установить ее вращение вокруг оси, даже если бы мы ничего не знали о кажущемся вращении небесного свода, например, если бы, подобно Венере, Земля была постоянно покрыта непроницаемой облачной завесой.

Аналогичные факты были известны и Ньютону, и он из них сделал чрезвычайно важный, далеко идущий вывод. Если вращение Земли можно установить, не наблюдая движения небесных тел, а ограничиваясь земными явлениями, то значит это вращение есть состояние Земли самой по себе, а не ее отношение к другим

телам. Но вращательное движение есть частный случай ускоренного движения, значит, всякое ускоренное движение есть состояние тела самого по себе, независимо от других тел. В самом деле, если тот пароход, о котором мы упомянули в связи с принципом относительности Галилея, внезапно резко изменит свою скорость, мы сразу обнаружим это ускорение без всякого наблюдения окружающих его тел. Итак, ускоренное движение тела есть его собственное состояние безотносительно к другим телам. В этом смысле можно сказать, что ускоренное движение есть абсолютное движение. Ньютон ввел понятие об абсолютном пространстве, в котором происходит это движение, как о вместилище всех тел, свойства которого не зависят от расположения и движения тел. Они остаются всегда неизменными и определяются законами евклидовой геометрии.

Аналогично этому, Ньютон ввел понятие об абсолютном времени, свойства которого совершенно не зависят от протекающих в нем материальных процессов. Это время одно и то же для всего мира, так что все явления в мире можно расположить в один ряд следующих одно за другим событий. Эти представления о пространстве и времени Ньютон положил в основу механики и всей физики.

Немецкий физик Мах обнаружил ошибку в выводе Ньютона об абсолютности ускоренного движения. Эта ошибка заключается в том, что Земля вращается не в пустом пространстве, а в пространстве, наполненном материей. Земля есть маленькая частица огромной системы звезд, называемой Галактикой. Галактика, в свою очередь, представляет собой часть еще более огромной системы, состоящей из бесчисленного множества галактик. Все эти гигантские мировые массы воздействуют на вращающуюся Землю, и у нас нет никаких оснований предполагать, что поворот маятника Фуко и кориолисово ускорение остались бы в их отсутствии. Следовательно, вращение Земли совсем не движение «само по себе», а движение по отношению к мировым массам. Точно так же явления, наблюдаемые при любом ускоренном движении, обязаны тому, что это движение происходит относительно мировых масс. Можно подумать, что представление о движении относительно мировых масс по существу не отличается от представления о движении относительно пустого пространства: и то, и другое абсолютно. Однако в действительности это не так; ведь сами мировые массы в разных частях Вселенной могут двигаться по-разному, так что движение относительно них отнюдь не равнозначно с абсолютным движением. Поэтому в дальнейшем, говоря о мировых массах, мы будем подразумевать те мировые массы, которые обуславливают поведение тел в данной области Вселенной.

Из своей критики Ньютона Мах сделал неверные выводы, которые в дальнейшем развитии науки были отвергнуты, и нас сейчас интересует лишь его идея о том, что особенности ускорен-

ного движения тел отнюдь не противоречат представлению об относительности движения.

Как же следует сформулировать общий закон движения Ньютона, имея в виду указанные выше отклонения от его упрощенной формы? Для ответа на этот вопрос нам придется начать с принципа инерции. Часто принцип инерции формулируют так: и изолированное тело, т. е. тело, удаленное от всех других тел и потому не подвергающееся их воздействию, движется равномерно и прямолинейно.

Однако в таком виде это утверждение неверно. Если, например, это тело движется прямолинейно и равномерно относительно Солнца, то оно не может в то же время двигаться прямолинейно и равномерно относительно Земли, обращающейся вокруг Солнца по приблизительно круговой орбите.

На самом деле принцип инерции следует сформулировать так: изолированные тела движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. В частности, их скорость относительно друг друга может оказаться равной нулю. В этом случае мы говорим, что такие тела образуют одну инерциальную систему. Разные инерциальные системы движутся относительно друг друга равномерно и прямолинейно или, короче говоря, инерциально. Теперь можно правильно сформулировать закон движения следующим образом: ускорение тела относительно инерциальной системы (или, как часто говорят, в инерциальной системе) определяется действующей на него силой.

Наличие на Земле отклонений от этого закона показывает, что она не является инерциальной системой. Инерциальными являются системы, движущиеся равномерно и прямолинейно по отношению к мировым массам (в данной области Вселенной). Вращающиеся тела не являются инерциальными системами и в них указанный выше закон неверен. Годовое же движение Земли вокруг Солнца с большой точностью почти инерциально и не приводит к заметным отступлениям от закона движения Ньютона.

Относительность движения и электромагнитное поле

После того как в XIX веке появилось представление об электромагнитном поле, проблема относительности движения стала рассматриваться иначе. Это представление, постепенно развиваясь, превратилось к концу века в одно из центральных понятий физики. Было установлено существование электромагнитных волн и выяснено, что свет — это есть частный случай электромагнитных волн, т. е. волнового электромагнитного поля. Теория электромагнитного поля (электродинамика) привела к

тому фундаментальному выводу, что всякое электромагнитное поле (в том числе и свет) распространяется в пространстве с определенной скоростью, приблизительно равной 300 000 км/сек, которую в физике принято обозначать буквой c . Этот вывод, вполне определенный в том случае, когда источник электромагнитных волн неподвижен, приводит к ряду новых вопросов при наличии его движения.

Существуют весьма убедительные доказательства того, что скорость распространения электромагнитного поля не зависит от скорости движения его источника.

Одно из таких доказательств дают так называемые двойные звезды, связанные силой взаимного тяготения и обращающиеся вокруг друг друга. Наблюдения показывают, что это обращение происходит в согласии с законом тяготения. Легко видеть, что этого не могло бы быть, если бы скорость распространения приходящего от них света зависела от их движения. Действительно, в этом случае двойные звезды, двигаясь в каждый момент в различных направлениях и с различными скоростями, испускали бы световые волны, распространяющиеся к Земле также с различными скоростями.

Пусть, например, в некоторый момент звезда A приближается к Земле, а звезда B удаляется от нее, причем в этот момент обе звезды находятся на одинаковом расстоянии от Земли. Тогда свет, испущенный звездой A , будет распространяться к Земле с иной (например, с большей) скоростью, чем свет от звезды B . При колоссальных расстояниях до звезд, которые свет проходит за промежутки времени, измеряемые годами и тысячелетиями, даже незначительные различия в скоростях распространения приведут к тому, что свет от звезды A придет к Земле значительно раньше, чем от звезды B . Одновременные положения звезд A и B мы воспримем как разновременные. Это создаст совершенно искаженную картину движения звезд, не имеющую ничего общего с движением под влиянием силы взаимного тяготения. В действительности же, как сказано выше, наблюдение двойных звезд показало, что они обращаются вокруг друг друга в полном согласии с законом тяготения. Отсюда следует, что скорость распространения света, испускаемого звездой, практически не зависит от скорости самой звезды.

Независимость скорости света от движения его источника означает, что свет и вообще электромагнитные волны распространяются всегда с одной и той же скоростью c . Спрашивается, по отношению к чему электромагнитное поле распространяется с этой неизменной скоростью. Можно было бы предположить, что по отношению к мировым массам. Если бы это было так, то мы получили бы возможность определить неизвестную нам скорость Земли по отношению к мировым массам. Действительно, если свет какого-либо источника распространяется в направлении движения Земли или в противоположном направлении

со скоростью c , а Земля движется со скоростью v , то свет распространяется по отношению к Земле со скоростью (рис. 1, а):

$$c' = c \mp v.$$

Если же свет распространяется перпендикулярно к направлению движения Земли, то его скорость по отношению к Земле равна (рис. 1, б):

$$c'' = \sqrt{c^2 + v^2}.$$

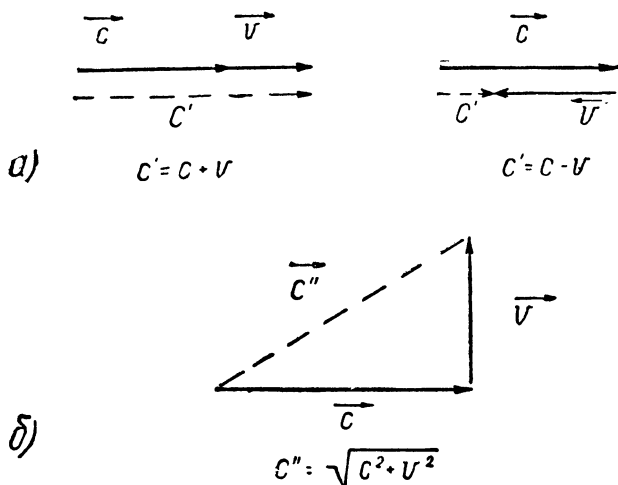


Рис. 1. Схема распространения света.

Сравнивая скорость света относительно Земли в разных взаимно перпендикулярных направлениях, мы могли бы определить скорость движения Земли относительно мировых масс. Майкельсон построил прибор, позволяющий осуществить такое сравнение.

Действие этого прибора поясняет рис. 2. Световой луч, распространяющийся из точки O , дойдя до полупрозрачного посеребренного зеркала A , частью проходит дальше до зеркала B , а частью отражается к зеркалу C . Лучи, отраженные от зеркал B и C (они условно изображены на рисунке пунктирными линиями $B'A'$ и $C''A''$), доходят до полупрозрачного зеркала A и опять частью проходят сквозь него, а частью отражаются. В результате один луч проходит по пути $OABA'O'$, а другой по пути $OACA''O'$ (в действительности точки A' и A'' совпадают с точкой A), после чего попадают в приемник O' . На пути AO' эти лучи встречаются, пройдя до этого разные расстояния от точки, где они разделились, и притом, как мы сейчас увидим, с разными скоростями. Поэтому они имеют разные фазы, т. е. электромагнитные колебания в них в разные моменты достигают максимума и минимума (рис. 3).

В волновой теории света доказывается, что когда такие лучи с разными фазами падают на экран, на нем обнаруживается явление интерференции, т. е. ряд равноотстоящих светлых и темных полос, в которых оба луча усиливают или ослабляют друг друга. Пусть плечо прибора AB расположено вдоль поступательного движения Земли и потому луч AB распространяется со скоростью $c \pm v$, а луч AC — со скоростью $\sqrt{c^2 + v^2}$, и эти лучи создают в точке O' систему интерференционных полос. Повернем теперь прибор на 90° , так чтобы плечо AC оказалось параллельно скорости Земли, а плечо AB — перпендикулярно ей. Тогда оба луча поменяются скоростями, вследствие чего изменится разность их фаз. Это должно было бы привести к смещению интерференционных полос, зная которое можно определить скорость движения Земли.

Опыт, произведенный многократно в различных условиях, дал отрицательные результаты: никакого смещения полос не было! Это значит, что оба луча распространяются в действительности с одинаковой скоростью. Таким образом мы приходим к неожиданному выводу, что скорость света относительно Земли во всех направлениях одинакова и равна c . Этот результат можно было бы объяснить предположением, что Земля покоится относительно мировых масс. Однако это объяснение означало бы возврат к геоцентрическому представлению и неприемлемо с точки зрения современной науки.

Правильное объяснение было предложено Эйнштейном и заключается оно в том, что не только по отношению к Земле, но и по отношению к любой инерциальной системе, свет и вообще электромагнитное поле распространяется с одной и той же скоростью c . Это объяснение представляет собой гипотезу, так как опыт Майкельсона до сих пор мог быть проделан только на Земле, но не на других небесных телах. Однако из этой гипотезы выте-

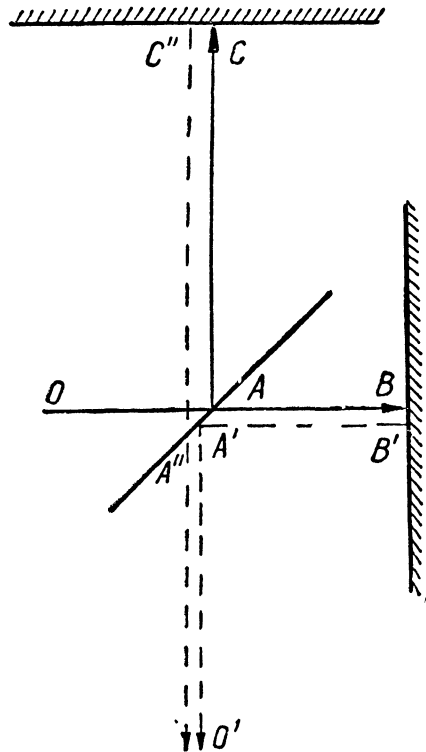


Рис. 2. Схема действия прибора Майкельсона.

кают многочисленные выводы, составляющие содержание теории относительности, и все выводы, которые до сих пор можно было сравнить с опытом, оказались верными. Поэтому в настоящее время нет сомнения в том, что когда нам удастся произвести опыт Майкельсона на других небесных телах, он приведет к тем же результатам, что и на Земле.

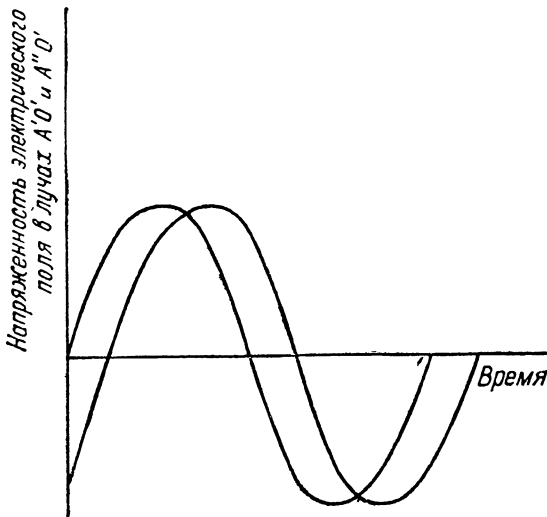


Рис. 3. Электромагнитные колебания в моменты максимума и минимума.

Из гипотезы Эйнштейна следует, что законы распространения электромагнитного поля в инерциальной системе не зависят от ее движения, совершенно так же, как и законы механики, и потому, находясь внутри такой системы и не наблюдая ее перемещение относительно других тел, невозможно определить ее скорость не только механическими, но и электромагнитными опытами. Это есть обобщение принципа относительности Галилея.

Прежде чем перейти к изложению теории относительности, мы остановимся на иной формулировке опыта Майкельсона, которую предпочитали его современники.

До возникновения теории относительности предполагали, что свет и вообще электромагнитное поле представляет состояние движения некоторого вещества — мирового эфира, непрерывно заполняющего пространство. Электромагнитные волны — это волнообразное распространение некоторых состояний эфира. Эфир не увлекается движущимися через него телами и, следовательно, он покоится относительно мировых масс. Но в таком случае движение Земли относительно эфира в то же время есть ее движение относительно мировых масс. Опыт Майкельсона в истолковании Эйнштейна приводит поэтому неизбежно к выводу о том,

что никакого эфира вообще нет. Следовательно, электромагнитное поле не есть состояние движения эфира.

Таким образом, электромагнитное поле лишилось вещественного носителя. Но так как нет никакого сомнения в материальности электромагнитного поля, то физика пришла к представлению об электромагнитном поле, как об особой форме материи, столь же реальной, как и вещество.

В настоящее время в результате развития квантовой теории и накопления экспериментальных данных об элементарных частицах возникло еще более общее представление о существовании в природе многочисленных форм материи, частными случаями которых являются и вещество и электромагнитное поле.

Основные понятия теории относительности

Итак, в основе теории относительности лежит следующее положение. Законы механических и электромагнитных явлений одинаковы во всех инерциальных системах. В частности, электромагнитное поле распространяется в любой инерциальной системе во всех направлениях с одной и той же скоростью, равной c .

На первый взгляд может показаться, что это положение сразу приводит к противоречиям. Представим себе, что в момент, когда поезд проходит мимо платформы со скоростью v , на платформе происходит световая вспышка и возникшая световая волна распространяется со скоростью c вдоль железнодорожной линии. Спрашивается, на какое расстояние успеет распространиться световой сигнал за время, равное, например, $\Delta t = 10^{-5}$ сек, от того места, в котором произошла вспышка.

Мы имеем здесь две инерциальные системы: систему поезда и систему платформы, и в обеих системах свет, согласно основному положению, распространяется с одной и той же скоростью c . Поэтому через время Δt световой сигнал распространится в обеих системах на расстояние $c \Delta t$ от места вспышки. Но так как поезд за это время переместится на $v \Delta t$, то, определив точку, до которой распространится сигнал в обеих системах, мы придем к следующим выводам:

1) в системе платформы сигнал распространится от того места платформы, где произошла вспышка, на расстояние $c \Delta t$,

2) в системе поезда сигнал распространится от того же места на расстояние $(c+v) \Delta t$ (рис. 4). Но этот вывод представляется абсурдным, так как сигнал исходит из одной определенной точки и приходит в другую определенную точку.

Таким образом, мы пришли к противоречию. Эйнштейн нашел выход из этого противоречия в смелой идее о том, что секунды и километры в обеих системах — это разные секунды и разные километры, т. е. что расстояние между одними и теми же материальными точками и промежутки времени между одними и теми же событиями — различны в разных системах. Как принято

говорить, расстояние в пространстве и промежутки во времени не инвариантны при переходе от одной системы к другой, но преобразуются при таком переходе по определенному закону.

Рассмотрим теперь второй пример. Пусть в некоторый момент с Земли, которую мы будем представлять, как точку A , вылетает в пространство космический самолет, изображаемый точкой

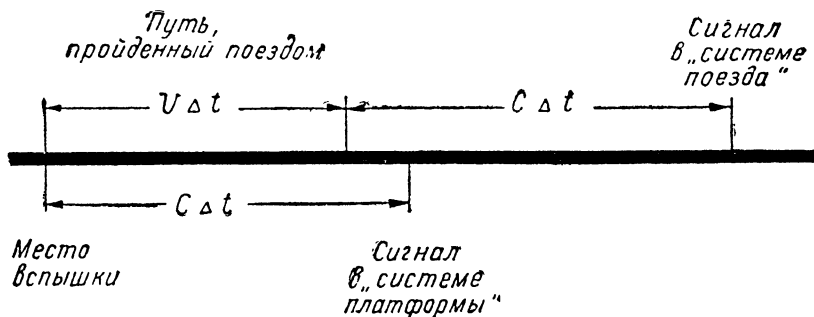
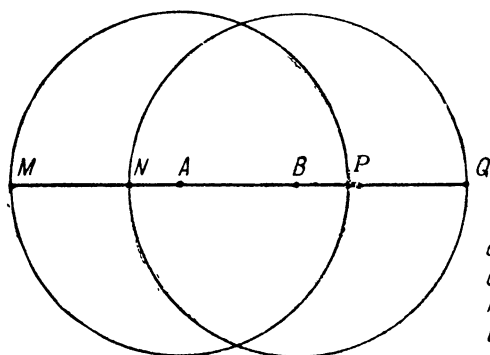


Рис. 4. Схема примера с двумя инерциальными системами: системой поезда и системой платформы.



В системе A волна достигает сначала N , затем одновременно M и P , а еще позже Q ;
 в системе B достигается сначала P , затем одновременно N и Q , а позже всего M .

Рис. 5. Схема примера с космическим самолетом.

B и движущийся равномерно и прямолинейно. В момент вылета самолета на Земле происходит световая вспышка и возникшая волна распространяется во все стороны с одной и той же скоростью c .

В системе Земли волновые поверхности, т. е. точки, которых волна достигает одновременно, представляют собой концентрические сферы с центром в точке A . В то же время в системе самолета волновые поверхности — сферы с центром в точке B . Те и другие сферы пересекаются, так как у них разные центры A и B (рис. 5). Этот вывод очевидно абсурден, так как волна,

одновременно достигшая всех точек одной сферы, не может одновременно достигнуть всех точек пересекающейся с ней сферы. Она должна достигнуть раньше точек, лежащих внутри первой сферы, и позже — точек, лежащих снаружи. И из этого противоречия Эйнштейн нашел выход в другой смелой идее о том, что события, одновременные в одной системе (например, в системе Земли), неодновременны в другой системе (в системе самолета), или, иначе говоря, одновременность относительна.

Таким образом, основное положение теории относительности может быть не противоречивым лишь в том случае, если пространственные и временные промежутки (а также и многие другие физические величины) преобразуются по определенным законам при переходе от одной системы к другой. Эти законы были впервые (в приближенной форме) установлены Лоренцем, а в более общей и точной форме — Эйнштейном и Пуанкаре.

Закон преобразования пространственных и временных промежутков носит название преобразований Лоренца. Если система A' движется относительно системы A со скоростью v , то длины отрезков, перпендикулярных к этой скорости, не меняются при переходе от одной системы к другой. Длины же отрезков l , параллельных скорости v , и промежутки времени t переходят в соответствующие величины l' и t' по уравнениям Лоренца:

$$l' = \frac{l - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

$$t' = \frac{t - \frac{v^2}{c^2} l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

Преобразования Лоренца лежат в основе всей теории относительности. Мы сейчас увидим, что в этих простых на вид уравнениях заключен целый мир необычных понятий и явлений. Из всего огромного богатства выводов мы сможем остановиться лишь на немногих, но и этого будет достаточно для того, чтобы читатель почувствовал, каким образом за математическими уравнениями может скрываться мир новых и парадоксальных физических идей, не укладывающихся в рамки наших обычных представлений.

II. ПРОСТЕЙШИЕ ВЫВОДЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Относительность длин

Обозначим через l_0 длину тела, т. е. расстояние между крайними его точками ab , в системе A , в которой оно покоится. Эта длина обычно называется длиной покоя. Она равна расстоянию между одновременными положениями точек a и b . Пусть система A' движется относительно системы A со скоростью v вдоль пря-

мой *ab*. Для того чтобы определить длину l' в новой системе, надо измерить расстояние между положениями точек a и b , определенными одновременно в новой системе, т. е. при условии $t'=0$. Но тогда, согласно уравнению (2), положения точек a и b в системе A определены неодновременно и промежуток времени между этими определениями

$$t = \frac{v}{c^2} l.$$

Но если положения концов тела определены не одновременно, то длина его, естественно, окажется иной. Подставляя полученное значение t в уравнение (1) и полагая $l=l_0$, имеем:

$$l' = \frac{l_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (3)$$

Таким образом, длина тела имеет наибольшее значение в системе покоя и сокращается при движении в отношении

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Изменения длины, предсказываемые теорией относительности, при обычных условиях исчезающе малы и не могут быть обнаружены на опыте непосредственно. Например, радиус Земли, обращающейся вокруг Солнца со скоростью $v \approx 30$ км/сек, уменьшается вследствие этого в инерциальной системе, связанной с Солнцем и звездами, на половину стомиллионной доли, т. е. приблизительно на 3 см. Однако современная микрофизика знает частицы гораздо большей скорости, столь близкой к скорости света, что их движение уже неудобно характеризовать его скоростью: ведь скорость может лишь приближаться к скорости света, не превосходя и даже не достигая ее. В этих случаях гораздо удобнее характеризовать движение энергией или импульсом (количеством движения), о которых мы будем говорить в дальнейшем. Наибольшими известными энергиями обладают частицы космических лучей. При таких энергиях размеры этих частиц могут уменьшаться (в системе Земли) по сравнению с размерами в системе покоя, т. е. в системе, связанной с самой движущейся частицей, в тысячи раз, и это уменьшение размеров очень сильно сказывается на всех их свойствах. И хотя мы не умеем непосредственно измерять размеры таких частиц, но все предсказываемые теорией изменения их поведения, например особенности их торможения в земной атмосфере, подтверждаются опытом. Значит, изменения длины, хотя и косвенно, подтверждаются на опыте.

Наш вывод об изменениях длины при переходе от одной системы к другой тесно связан с относительностью одновременности: если положения концов тела определены одновременно в одной системе (например, в системе покоя), то в другой системе эти

определения уже не будут одновременными, но окажутся разделенными некоторым промежутком времени, тем большим, чем больше относительная скорость этих двух систем. Величина этого промежутка времени, так же как и связанного с ним изменения длины, определяется из того условия, что скорость света должна быть одинакова в обеих системах. Это есть экспериментальный факт, твердо установленный в связи с опытом Майкельсона и рядом других аналогичных опытов.

Теория относительности не ставит вопроса «почему это так?»: почему скорость света не меняется при переходе от одной системы к другой, а промежутки времени и длины меняются, но принимает это за исходный факт или исходный закон природы и делает из этого факта многочисленные важные выводы. Такая постановка задачи (отсутствие ответа на вопрос «почему это так?») не есть недостаток теории относительности, но есть общий принцип науки.

Что значит «объяснить какое-либо явление или объяснить какой-либо закон природы»? Это значит: найти такой более общий и более глубокий закон природы, частным случаем которого он является.

Открытие Ньютоном закона всемирного тяготения есть одно из важнейших событий в истории физики. Но можно ли сказать, что Ньютон объяснил, почему камень падает на Землю? В обычном смысле — нет, потому что утверждение: «камень падает потому, что на него действует сила, заставляющая его падать», — имеет не больше содержания, чем утверждение: «свет освещает потому, что он светлый», — т. е. не имеет никакого содержания. И Ньютон сделал не это утверждение, а совсем иное: та же самая сила, которая заставляет камень падать на Землю, заставляет Луну обращаться вокруг Земли, Землю вокруг Солнца (а Солнце — прибавим мы теперь, через два с лишним столетия после Ньютона — обращаться вокруг центра галактики).

В каком же смысле эта сила «та же самая»? Выражение «та же самая» означает, что она во всех случаях одинаково зависит от масс взаимодействующих тел и расстояния между ними, хотя ее общее выражение можно упрощать по-разному в разных случаях. Таким образом, падение камня на Землю (закон которого был установлен Галилеем почти за 100 лет до Ньютона) было «объяснено» в том смысле, что оно оказалось частным случаем явления всемирного тяготения.

Однако на каждой стадии развития науки определенные законы природы являются основными, т. е. неизвестны более общие и глубокие законы, частным случаем которых они являются.

Во времена Ньютона одним из таких основных законов являлся как раз закон всемирного тяготения: нельзя было ответить на вопрос о том, «почему» (т. е. при каких частных условиях) два тела взаимодействуют с силой, пропорциональной произведению масс, деленному на квадрат расстояния.

В наше время наука сделала еще один шаг: Эйнштейн открыл, что явление тяготения связано с отклонением геометрии пространства от евклидовой и течения времени — от равномерного, и установил более общий закон, частным случаем которого является закон тяготения Ньютона. На вопрос: «почему камень падает на Землю», мы можем теперь ответить: «потому что вблизи Земли пространство и время имеют не Ньютону структуру».

Но сам новый закон Эйнштейна в настоящее время является основным законом природы, и мы не можем теперь ответить на вопросы «почему?», относящиеся к этому закону.

В этой новой теории (общей теории относительности) скорость света уже не инвариантна, но зависит от структуры пространства-времени, т. е. от поля тяготения, так что законы преобразования промежутков времени и длин — иные, чем в прежней теории (частной теории относительности). Однако мы не будем касаться этих новых и сложных идей, и для нас неизменности скорости света и преобразования Лоренца будут основными законами, так как при решении очень большого количества проблем современной физики их можно считать оправдывающимися с большой точностью.

Итак, теория относительности приводит к выводу о том, что длина есть величина относительная. Это значит, что она зависит не только от свойств самого тела, но и от той материальной системы (системы отсчета, как обычно говорят), к которой она отнесена. Она характеризует отношение тела к разным материальным системам.

Относительность промежутков времени

Пусть в самолете, летящем со скоростью v , происходит некоторое явление, которое по измерению в системе самолета (например, с помощью часов, движущихся с самолетом) длится время t_0 . В системе самолета начало и конец этого явления происходят в одной точке. При этих условиях промежуток времени между началом и концом называется «собственным временем».

Спрашивается, какова длительность этого явления в системе Земли (т. е. по часам, находящимся на Земле)? Согласно уравнению (2), полагая $l=0$; $t=t_0$, имеем:

$$t' = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (4)$$

Следовательно, собственное время, т. е. промежуток между двумя событиями в той системе, где они происходят в одной точке, есть наименьший промежуток времени. В любой другой системе он больше в отношении

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

При встречающихся в природе скоростях макроскопических тел изменения промежутков времени ничтожно малы. Промежуток времени между двумя событиями, происшедшими на Земле, если определить этот промежуток в системе Земли, меньше промежутка времени между теми же событиями в системе Солнца на половину стомиллионной доли. Такое изменение нельзя непосредственно измерить. Но в случае микрочастиц, пролетающих через земную атмосферу с колоссальными скоростями, очень близкими к скорости света, собственные промежутки времени между какими-либо изменениями (например, столкновениями), испытываемыми этими частицами, могут быть в сотни и даже тысячи раз меньше промежутков времени между этими же столкновениями в системе Земли. И хотя эти промежутки времени в настоящее время трудно измерить непосредственно, их изменения можно установить по многочисленным особенностям поведения таких частиц.

Итак, промежуток времени между двумя событиями в некотором процессе есть также величина относительная: он зависит не только от свойств самого процесса, но и от его отношения к материальной системе, являющейся системой отсчета. Иначе говоря, промежуток времени характеризует не только сам процесс, но и его взаимодействие с некоторой материальной системой.

Представление об относительности времени, естественно, сложнее, чем представление об относительности пространства. Временем мы не владеем в такой же мере, как пространством. О «машине времени» пишут лишь фантастические романы, тогда как «машины пространства» представляют собой совершенно реальный факт. Время течет неумолимо и неизменно, и мы не обладаем возможностями изменить его течение.

Что такое прошлое? Не так просто ответить на этот вопрос. Но несколько упрощая, можно сказать, что прошлое — это совокупность событий, которые могут воздействовать на события настоящего времени, могут явиться их причиной.

А будущее? Будущее — это совокупность событий, которые могут быть следствием событий настоящего времени. Настоящее же — это граница между тем и другим.

Отсюда ясна связь понятия времени с понятием взаимодействия. Именно так по критерию взаимодействия или связи причины и следствия возможно разделить все множество мировых событий на прошлые, настоящие и будущие.

Путешествие во времени

Человек овладел пространством в большей степени, чем временем. В пространстве можно перемещаться в произвольном направлении с произвольной в широких пределах скоростью. Во времени мы не имеем такой возможности. Поток времени несет нас с собой, не оставляя возможности ни отстать, ни опередить его. Впервые теория относительности дает указание на прин-

ципиальную возможность, хотя бы в малой степени, овладения временем. Эту возможность мы сейчас и рассмотрим.

Пусть с Земли в мировое пространство вылетает космический самолет со скоростью v , весьма близкой к скорости света, и через некоторое время возвращается на Землю с той же скоростью. В системе самолета путешествие длится в течение времени t_0 , которое, согласно данному выше определению, есть собственное время, а в системе Земли его длительность больше, так как она определяется по уравнению (4):

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Если, например, скорость самолета равна $0,9999 c$, а собственное время путешествия t_0 равно одному году, то при возвращении самолета на Землю окажется, что на Земле прошло примерно 70 лет! Это различие времен отнюдь не следует представлять как отвлеченную математику; теория предсказывает здесь совершенно реальное явление.

Пассажиры самолета постареют за это время как раз на один год. Съеденные ими за это время продукты соответствуют годовой потребности. Растения, имевшиеся на самолете, вырастут в соответствии с тем же сроком. Распад радиоактивных элементов произойдет на величину, соответствующую одному году. Наконец, пружинные часы, находившиеся на самолете, покажут промежуток времени в один год.

Одним словом, говоря о том, что в системе самолета прошел один год, мы имеем в виду, что все материальные процессы протекали в этой системе по обычным законам, в соответствии с этим сроком. В то же время на Земле совершенно реально прошло 70 лет. Семьдесят раз она обошла по своей орбите вокруг Солнца. Прежнее поколение на ней сменилось новым, и вернувшиеся путешественники не найдут почти никого из знакомых им людей. Таким образом они реально попадут в будущее Земли.

Возникает вопрос, ведь самолет и Земля двигались друг относительно друга; их движение было относительным, взаимным. Почему же самолет попал в будущее Земли, а не наоборот, Земля в будущее самолета? Причина этого заключается в том, что эти две системы отнюдь не были равноправными.

Земля все это время оставалась почти инерциальной системой, на самолете же находился двигатель, который должен был заставлять его, хотя бы часть времени, двигаться ускоренно; иначе не было бы возможным возвращение самолета на Землю. Таким образом, система самолета не была все время инерциальной, и именно относительно самолета можно сказать, что он вылетел с Земли и вернулся обратно на нее.

При наибольших современных скоростях самолетов, превышающих 1000 км/час , путешествие по замкнутой линии, длящееся,

например, 10 часов, привело бы нас в «будущее» всего примерно на 3 стомиллионных доли секунды, и потому при обычных скоростях, много меньших скорости света, путешествия в будущее практически не происходит.

Таким образом теория относительности указывает лишь на принципиальную возможность путешествия в будущее, реализация которой представляет в лучшем случае весьма отдаленную перспективу.

Наши рассуждения были бы неполны, если бы мы не рассмотрели вопроса о путешествии в прошлое. Легко убедиться, что путешествие в прошлое принципиально невозможно и никакая правильная теория не может к нему привести. Для этого покажем, что предположение о возможности такого путешествия приводит к нелепым выводам. Представим себе, что при определенных условиях движения нашего космического самолета он мог бы привести нас в прошлое. Мы могли бы воспользоваться этим для того, чтобы изменить события прошлого, приведшие к уже известным нам результатам. Путешественник в прошлое мог бы, например, снабдить греков, осажденных турками в Константинополе в 1453 году, современными военными средствами и тем предотвратить взятие Константинополя. Но это была бы нелепость, так как в действительности турки взяли Константинополь и в настоящее время владеют им.

Представим себе другой пример. Мы отправляемся в прошлое, например, 31 декабря 1955 года к другу, погибшему 1 января 1956 года при автомобильной аварии. Мы рассказываем ему, что прибыли из будущего, что нам известна ожидающая его гибель и предупреждаем, что он не должен выходить на улицу на следующий день, т. е. в день катастрофы. Убеденный нашими доводами он соглашается с нами и остается жив.

Разумеется, такой результат опять нелеп, так как нам заранее известно, что наш друг уже погиб. В чем же общая причина полученных нами нелепостей? В том, что возможность путешествия в прошлое означает возможность воздействия будущего на прошлое, следствий на причины. Эта возможность противоречит принципу причинности, являющемуся основным принципом науки, и потому ее допущение приводит к абсурдным выводам.

В полном согласии с этими общими соображениями теория относительности указывает на возможность путешествия в будущее, но исключает возможность путешествия в прошлое.

Путешествие к звездам

С развитием астрономических знаний мы узнаем все большую часть Вселенной. Максимальные размеры нашей звездной системы — Галактики таковы, что свету требуется несколько десятков тысяч лет, чтобы пройти ее из конца в конец.

Современные телескопы проникают в мировое пространство далеко за пределы нашей Галактики, на расстояния, которые свет проходит за десятки и сотни миллионов лет. Так как в природе не существует скорости, превышающей скорость света, и, следовательно, мы не можем надеяться на изобретение в будущем сверхсветового космического самолета, то неизбежным является неутешительный вывод, что подавляющая часть окружающего нас мира, недоступная для нас сейчас, останется практически недоступной навеки, так как вряд ли можно рассчитывать на организацию путешествия, длящегося миллионы лет. Однако теория относительности и здесь указывает на некоторые новые возможности.

Дело в том, что в системе самолета, летящего со скоростью, близкой к скорости света, все расстояния будут уменьшены согласно уравнению (3). Вместе с тем уменьшается и собственное время путешествия. Поэтому, по мере того как техника будущего будет осуществлять все большее и большее приближение скорости космических самолетов к скорости света, все более удаленные миры будут становиться принципиально достижимыми. Правда, их достижение должно будет оплачиваться все более дорогой ценой, так как возвращающиеся назад путешественники будут попадать на Землю во все более отдаленное будущее. Значит, человек, отправляющийся в такое путешествие, должен навеки порвать со всеми своими привязанностями на Земле и попрощаться со всеми близкими, которых он никогда больше не увидит.

Здесь опять следует подчеркнуть, что указанная принципиальная возможность (создание космического самолета, летящего со скоростью, близкой к скорости света) в наше время еще чрезвычайно далека от практической осуществимости.

Интервал

Пусть два события происходят в двух разных точках пространства, находящихся на расстоянии l друг от друга и в разные моменты времени, промежуток между которыми равен t .

Значения величин l и t зависят от системы, в которой они определены.

Величина $l^2 - c^2 t^2$ называется интервалом между этими событиями. Он обозначается обычно S^2 .

Итак,

$$S^2 = l^2 - c^2 t^2. \quad (5)$$

Интервал обладает несколькими важными свойствами. Прежде всего, используя уравнение (1) и (2), легко показать, что во всех инерциальных системах интервал между данными событиями одинаков:

$$l^2 - c^2 t^2 = l'^2 - c^2 t'^2.$$

Иначе говоря, интервал между событиями инвариантен при переходе от одной системы к другой. В то время как расстояния в пространстве и промежутки во времени изменяются при таком переходе по уравнениям (1) и (2), интервал остается неизменным. Значит, интервал есть более фундаментальное отношение между событиями, чем расстояние в пространстве и промежуток во времени. Можно различать три разных случая интервалов между событиями.

1) Интервал между событиями положителен:

$$l > ct.$$

Это значит, что расстояние l между событиями столь велико, что электромагнитная волна, распространяясь со скоростью c , не успеет за промежуток времени t между ними дойти от одного до другого. Но скорость c есть максимальная существующая в природе скорость. Значит, ни одно материальное воздействие не может связать эти события. Они независимы друг от друга. Такие пары событий называются абсолютно удаленными друг от друга.

Промежуток времени между ними зависит от того, в какой системе он определяется. Существует такая система, в которой он равен нулю и оба события одновременны. По этой причине положительный интервал называется пространственно-подобным.

Существуют и другие системы, в которых первое событие предшествует второму событию во времени, и такие, в которых одно следует за вторым. Именно к таким парам событий и относится понятие относительности одновременности, о которой речь шла выше.

2) Интервал между событиями отрицателен:

$$l < ct.$$

Расстояние между событиями мало, и электромагнитное поле успеет распространиться от одного до другого. Поэтому события могут быть связаны причинно-следственной связью и их порядок во времени должен быть одним и тем же во всех системах. Одно из них является абсолютно будущим по отношению к другому, а второе — абсолютно прошлым по отношению к первому. Что касается расстояния между ними, то оно различно в разных системах и существует такая система, в которой оба они происходят в одном месте. По этой причине отрицательный интервал называется временно подобным. Примером его может быть интервал между событиями, заключающимися в выходе поезда со станции A и в его приходе на станцию B . В системе поезда оба события происходят, очевидно, в одном месте.

3) Интервал равен нулю:

$$l = ct.$$

Оба события могут быть связаны распространяющейся электромагнитной волной. Инвариантность интервала делает его одним из важнейших понятий теории относительности, лежащим в основе ее математического аппарата.

Относительность траекторий

Теперь, когда мы познакомились со свойствами относительности пространственных и временных промежутков, можно перейти к рассмотрению относительности траектории движущегося тела.

Пусть камень падает на пол в движущемся вагоне. В системе вагона движение камня происходит по прямой, а в системе платформы, мимо которой проходит вагон,— по параболе. Какая из этих траекторий истинная?

Этот вопрос не имеет смысла: обе траектории одинаково истинны, обе существуют объективно. Траектория камня есть некоторое проявление его взаимодействия с полом вагона или с платформой. Пусть два камня движутся параллельно с одинаковой скоростью, но один из них пробивает пол вагона, а другой платформу, сделанную из того же материала. Тогда наклоны пробоин будут разные, и это доказывает объективное различие траекторий. Высказывалось мнение, что истинной следует считать только траекторию камня в системе Земли, так как само движение камня вызвано притяжением к Земле. Однако простой пример обнаруживает неправильность этого мнения.

На Земле существует явление приливов, заключающееся в том, что вода океанов и морей дважды в сутки надвигается на берег и дважды отходит от него.

В какой системе надо исследовать это явление?

Так как оно вызвано притяжением Луны и отчасти Солнца, то, придерживаясь указанного мнения, следовало бы выбрать одну из этих систем (или что-то промежуточное между ними). Но это, очевидно, абсурдно, так как приливы происходят на Земле и энергия прилива может приводить в движение машины на Земле. Итак, относительность траектории проявляется в том, что траектория тел в разных системах различна. Например, у падающего камня имеются различные траектории по отношению к вагону и по отношению к платформе. Хотя эти траектории одинаково реальны и объективны, но возникает вопрос: не существует ли субъективного произвола в выборе системы отсчета, в которой определяется траектория? Мы сейчас увидим, что никакого субъективного произвола нет. Даже самый термин «выбор» неуместен, и при исследовании любого физического явления система отсчета определяется единственным образом.

Наблюдая падение камня по отношению к вагону, мы делаем это, очевидно, для того, чтобы определить действие камня на пол вагона. Мы «выбрали» бы систему платформы для исследо-

вания действия камня на платформу. Полученный в любой системе вывод представляет собой объективный факт, ни в какой мере не зависящий от субъективного произвола.

Итак, траектория тела есть некоторая объективная характеристика его взаимодействия с другими телами и ее относительность несколько не противоречит этому.

Сложение скоростей

Пусть в некоторой системе (например, на пароходе) движется тело со скоростью u . Если оно проходит расстояние l за время t , то

$$u = \frac{l}{t}.$$

Перейдем к другой системе (например, системе берега), относительно которой первая система (пароход) движется со скоростью v в направлении, совпадающем с направлением движения тела. Тогда новая система движется относительно старой со скоростью $-v$. В новой системе скорость тела

$$u' = \frac{l'}{t'}.$$

В классической механике, как известно

$$u' = u + v. \quad (6)$$

В механике теории относительности это соотношение существенно усложняется.

Разделим уравнение (1) на уравнение (2) и заменим v на $-v$, тогда

$$\frac{l'}{t'} = \frac{l + vt}{t + \frac{v}{c^2} l}.$$

Разделим числитель и знаменатель правой стороны на t , тогда получим:

$$u' = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}. \quad (6-a)$$

Это и есть новая формула сложения скоростей. Она сводится к прежней, когда скорости u и v малы по сравнению со скоростью света c , так как при этом вторым членом в знаменателе можно пренебречь по сравнению с единицей. Положение изменяется при возрастании этих скоростей, так как скорость u' растет при этом все медленнее и медленнее. Наконец, когда одна из этих скоростей, например u , становится равной скорости света, то мы получаем совершенно новый результат, принципиально отличный от классического. В самом деле, при $u=c$

$$u' = \frac{c + v}{1 + \frac{v}{c}} = c,$$

т. е. при прибавлении к скорости света любой другой скорости получается по-прежнему скорость света! Например, если мы сначала рассматривали распространение света в системе парохода, а затем перешли к его распространению в системе берега, то в обоих случаях скорость распространения оказывается одинаковой.

Этот вывод объясняет отрицательный результат опыта Майкельсона.

Эффект Доплера

Известно, что когда паровоз удаляется от нас, то тон его гудка понижается, т. е. понижается частота приходящих к нам звуковых колебаний, а при приближении паровоза тон гудка, а следовательно, и частота приходящих колебаний, повышается. Это изменение частоты колебаний при движении их источника называется эффектом Доплера. Аналогичное явление происходит и со световыми колебаниями. Когда звезда приближается к нам, то испускаемые ею спектральные линии смещаются к фиолетовому концу спектра, а при удалении — к красному концу спектра. Оба явления аналогичны, так как при увеличении частоты колебаний длина волны уменьшается и наоборот.

Если обозначить частоту световых колебаний в системе звезды буквой ν , а частоту колебаний в системе Земли ν' , то классическая теория эффекта Доплера показывает, что

$$\nu' = \nu \left(1 - \frac{v_{\lambda}}{c} \right), \quad (7)$$

где v_{λ} — скорость вдоль луча зрения (т. е. вдоль линии, соединяющей звезду с Землей), которая считается положительной при удалении источника и отрицательной при его приближении.

Белопольский, а за ним и другие астрофизики использовали эффект Доплера для определения так называемых лучевых скоростей звезд. Сравнивая длину волны спектральной линии, испущенной атомами какого-либо элемента на звезде, с длиной волны, испускаемой тем же элементом на Земле, можно определить соответствующие частоты (так как длина волны, обозначаемая буквой λ , связана с частотой соотношением $\lambda = \frac{c}{\nu}$), а зная ν и ν' , можно по уравнению (7) определить лучевую скорость v_{λ} .

Таким образом, эффект Доплера играет важную роль в современной физике. Классическая теория объясняла этот эффект тем, что при приближении источника света число волн, ежесекундно приходящих от него, увеличивается, а при удалении источника — уменьшается.

Теория относительности внесла изменение и в представление о происхождении эффекта Допплера и в классическую форму (7):

$$\nu' = \nu \frac{1 - \frac{v_{\pi}}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (8)$$

Принципиальное отличие уравнения (8) от уравнения (7) заключается в том, что согласно теории относительности ν' отлично от ν даже если v_{π} равно нулю, т. е. если движение источника света происходит перпендикулярно к лучу зрения. В этом случае имеет место так называемый поперечный эффект Допплера:

$$\nu' = \frac{\nu}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

существование которого подтверждено экспериментально.

Изменение частоты при эффекте Допплера связано, согласно теории относительности, с изменением промежутков времени или, если можно так выразиться, с изменением скорости течения времени в системе источника света по сравнению с системой Земли. Для понимания физического смысла эффекта Допплера надо иметь в виду, что изменение частоты при переходе от одной системы к другой не есть что-либо кажущееся, субъективное, но есть совершенно реальное физическое явление, так что частоты в разных системах одинаково реальны.

Можно представить себе следующий «мысленный опыт». Пусть звезда A испускает свет определенной частоты ν , попадающий на два других небесных тела: B_1 и B_2 , приближающихся к звезде A со скоростями v_1 и v_2 . Положим, что v_1 больше v_2 . Тогда, вследствие эффекта Допплера, частота света, испущенного звездой A , будет в системе B_1 больше, чем в системе B_2 . Обозначим эти частоты через ν_1 и ν_2 . Поставим на телах B_1 и B_2 фотоэлементы, которые могут под действием света приводить в движение определенные механизмы. Каждый фотоэлемент имеет порог чувствительности, т. е. он срабатывает лишь в том случае, если частота падающего света превышает пороговую частоту ν_0 , определяемую свойствами его вещества. Пусть оба фотоэлемента сделаны из одного вещества, так что у них одна и та же пороговая частота. Мы можем выбрать эту пороговую частоту так, чтобы она заключалась между ν_1 и ν_2 . Тогда ν_1 будет выше порога, а ν_2 ниже порога. Фотоэлемент на теле B_1 сработает и приведет в действие механизмы, а фотоэлемент на теле B_2 не сработает. Это различие в материальном действии света на одинаковые устройства доказывает объективное различие частоты в системах B_1 и B_2 .

III. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В ФИЗИКЕ

Инертная масса

Согласно классической механике Ньютона, действие силы на какое-нибудь тело создает его ускорение, пропорциональное этой силе. К разным телам нужно приложить различные силы, чтобы получить заданное ускорение. Чем большая сила нужна для сообщения телу данного ускорения, тем больше его инертность. Инертная масса тела, численно равная отношению силы к создаваемому ею ускорению, и есть мера инертности тела.

Вопрос о том, какое внутреннее свойство тела определяет его инертность, т. е. его реакцию на действие внешней силы, на разных стадиях развития науки получал различные ответы.

До конца прошлого века многие физики придерживались взгляда Ньютона о том, что инертность тела определяется исключительно количеством содержащегося в нем вещества или, иначе, количеством атомов, из которых оно состоит. Это подтверждалось тем экспериментальным фактом, что инертная масса тела при обычных условиях представляет собой неизменную его характеристику, не зависящую от внешних условий и состояния тела, в частности от скорости его движения. Неизменность инертной массы привела к тому, что ее стали отождествлять с материей или, по крайней мере, считать ее единственным универсальным признаком материи.

Когда возникла электронная теория, т. е. представление о существовании в природе элементарных заряженных электричеством частиц, появилась идея о том, что движение такой частицы, представляющей собой электрический ток, сопровождается возникновением магнитного поля. Это поле обладает энергией, пропорциональной квадрату скорости частицы. Поэтому энергия движущейся заряженной частицы состоит из двух частей: кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$ и магнитной энергии, которая также пропорциональна квадрату скорости и которую поэтому можно написать в виде $\frac{m'v^2}{2}$, где m' — некоторый коэффициент, зависящий от свойств частицы.

Полная энергия движения $\frac{(m+m')v^2}{2}$ имеет такой вид, как если бы полная инертная масса частицы состояла из двух частей: обычной или механической инертной массы m и так называемой электромагнитной массы m' . Возник вопрос о том, какая доля инертной массы электрона, протона и других элементарных частиц имеет электромагнитное происхождение? Этот вопрос оказался необычайно трудным, и он не решен до настоящего времени. Однако одно обстоятельство было установлено сразу. При больших

скоростях движения, приближающихся к скорости света, электромагнитная масса должна заметно возрастать со скоростью. Поэтому, когда Кауфман обнаружил зависимость инертной массы очень быстрых электронов от скорости, это открытие было воспринято как доказательство электромагнитной природы инертной массы электрона.

Теория относительности принципиально изменила истолкование опытов Кауфмана. Она доказала, что всякая инертная масса независимо от своей природы растет с увеличением скорости по общему закону:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (9)$$

где m_0 — так называемая масса покоя, т. е. инертная масса тела в той системе, где оно покоится.

Рост инертной массы при больших скоростях можно понять так: сила, действующая на тело, создает его ускорение, т. е. ежесекундно прибавляет к уже достигнутой им скорости некоторую постоянную величину, численно равную ускорению. Пока скорость тела значительно меньше скорости света, это прибавление происходит по классическому закону сложения скоростей (6). Когда же скорость приближается к скорости света, классический закон заменяется релятивистским законом (6-а). Согласно этому закону, изменение скорости тела меньше прибавляемой скорости (в формуле (6-а) u' отличается от u меньше чем на величину v) и при приближении скорости тела к скорости света ее изменение стремится к нулю. Это значит, что по мере приближения скорости тела к скорости света действующая на тело сила будет производить все меньшее и меньшее изменение его скорости за секунду, а, следовательно, инертность тела будет становиться все большей и большей.

Зависимость инертной массы от скорости показала, что эта масса не есть мера «количества вещества», так как при изменении скорости тела количество содержащегося в нем вещества не меняется. Можно было бы предположить, что масса покоя есть мера «количества вещества», однако в дальнейшем мы увидим, что и это предположение неверно.

Современная физика выяснила, что самое понятие «количества вещества» в теле не имеет смысла и должно быть устранено из науки.

Количественному определению поддаются отдельные конкретные свойства тела: можно говорить о количестве атомов в теле; можно указать числа, определяющие его инертную массу, его энергию, его вес и т. д. Все эти величины различным образом определяют поведение тела, его воздействия на другие тела и его реакцию на их воздействия. Изучая эти явления, мы и можем определить количественно перечисленные свойства тела. Изучение

поведения тела показало, что такая величина, как «количество вещества», не проявляется ни в каких явлениях, и потому она была устранена.

Наряду с понятиями инертной массы и скорости важное значение в классической механике имеет понятие количества движения, или импульса.

Сила вызывает изменение импульса тела, и закон движения Ньютона может быть сформулирован так, что изменение импульса в единицу времени равно силе. В такой форме этот закон остается верным и в релятивистской механике (т. е. в механике теории относительности) с той разницей, что теперь изменение импульса связано с изменением обоих множителей: и инертной массы, и скорости.

Энергия

В классической механике мы приходим к понятию об энергии тела следующим образом. Если нам известна сила f , действующая на тело и ускоряющая его движение, то мы можем ответить на два вопроса:

1. За какой промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ скорость тела изменится от v_1 до v_2 , т. е. на величину $\Delta v = v_2 - v_1$ и

2. На каком расстоянии Δl скорость тела изменится на эту величину.

Для ответа на первый вопрос служит понятие количества движения, или импульса, тела p . Изменение импульса $\Delta p = p_2 - p_1$ за некоторый промежуток времени Δt равно силе, умноженной на этот промежуток:

$$\Delta p = f \Delta t.$$

Так как импульс p равен mv , то при независимости инертной массы тела от его скорости получим:

$$\Delta t = \frac{f}{\Delta p} = \frac{f}{m(v_2 - v_1)}.$$

Для ответа на второй вопрос помножим равенство $\Delta p = f \Delta t$ на среднюю скорость движения тела в течение этого времени. Будем считать промежуток времени Δt столь малым, что за это время скорость тела изменилась ничтожно мало и среднюю скорость можно определить по формуле:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}.$$

Тогда справа мы получим произведение $f v \Delta t = f \Delta l$, где Δl — пройденное расстояние, а слева получим:

$$m(v_2 - v_1) \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Окончательный результат имеет вид:

$$f\Delta l = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Выражение, стоящее слева, т. е. произведение силы на путь, пройденный телом, называется работой силы на этом пути, а выражение $\frac{mv^2}{2}$ называется кинетической энергией тела. Следовательно, полученный результат означает, что работа силы, ускоряющей какое-либо тело, равна увеличению его кинетической энергии. Поэтому, зная силу и расстояние, пройденное телом, можно определить изменение его скорости. Итак, согласно классической механике, для того чтобы изменить скорость тела от v_1 до v_2 , необходимо произвести работу A_{12} , равную увеличению кинетической энергии тела E :

$$A_{12} = E_2 - E_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Аналогичный расчет в релятивистской механике приводит к следующему результату: работа ускоряющей силы, т. е. увеличение энергии тела E , равна увеличению инертной массы тела, умноженному на квадрат скорости света:

$$A_{12} = E_2 - E_1 = (m_2 - m_1)c^2. \quad (10)$$

Уравнение (10) определяет разность энергий двух состояний тела.

Следовательно, энергия тела массы m равна:

$$E = mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (11)$$

Это есть закон пропорциональности энергии и массы, имеющий много важных применений в современной физике и технике.

В отличие от классического случая энергия покоящегося тела отлична от нуля, т. е. существует энергия покоя, $E_0 = m_0c^2$. Энергия тела, движущегося со скоростью v_1 , малой по сравнению со скоростью света, приблизительно равна:

$$E = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2,$$

т. е. отличается от классического выражения энергии как раз на энергию покоя.

Существование энергии покоя доказывается рядом фактов, из которых мы остановимся на одном.

В современной физике известна наряду с электроном другая элементарная частица — позитрон, имеющий ту же массу покоя, что и электрон, и отличающийся от него лишь знаком своего электрического заряда. При встрече позитрона с электроном мо-

жет произойти так называемая аннигиляция этих частиц, при которой они исчезают, а вместо них возникает один или два кванта невидимого излучения (называемые гамма-квантами и по своей природе аналогичные гамма-излучению радиоактивных элементов).

Опыт показывает, что суммарная энергия этих гамма-квантов зависит от энергии аннигилировавших частиц и ее минимальное значение равно $2m_0c^2$, т. е. суммарной энергии покоя частиц.

Кванты минимальной энергии появляются в том случае, когда частицы перед аннигиляцией двигались настолько медленно, что их энергия практически не отличалась от энергии покоя.

Значит, покоящемуся электрону, так же как и покоящемуся позитрону, следует приписать энергию покоя m_0c^2 , которая при аннигиляции превращается в минимальную энергию появляющихся гамма-квантов.

Теперь мы можем показать, что масса покоя действительно не есть мера «количества вещества» в теле, а связана с его энергией. Пусть в некотором сосуде имеется большое количество одинаковых частиц, например молекул газа, движущихся с различными скоростями. Совокупность этих частиц в целом находится в состоянии покоя, и потому их суммарная энергия есть энергия покоя газа в целом. Она равна:

$$E_0 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} + \dots$$

Согласно закону пропорциональности энергии и массы, масса покоя всего газа:

$$M_0 = \frac{E_0}{c^2} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} + \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} + \dots$$

Отсюда видно, что масса покоя нашего газа определяется суммарной энергией его частиц, т. е. зависит не только от их масс покоя, но и от их скоростей. В частности, масса газа должна зависеть от его температуры, определяющей, как известно, энергию теплового движения его молекул. Этот вывод верен не только для газа, но и для твердых и жидких тел. При достижимых в настоящее время температурах изменение массы с температурой ничтожно мало, но в принципе всегда имеет место.

Дефект массы

Теперь мы перейдем к важнейшему применению закона пропорциональности энергии и массы, а именно к объяснению дефекта массы атомных ядер.

Атомные ядра состоят из элементарных частиц двух видов: протонов и нейтронов. Эти частицы отличаются друг от друга в

основном тем, что протоны имеют положительный электрический заряд, в то время как нейтроны лишены электрического заряда, а также некоторыми другими свойствами. Массы обеих этих частиц превосходят массу электрона примерно в 1840 раз и почти в точности равны друг другу. Протоны и нейтроны имеют общее название — нуклоны, происходящее от латинского слова «нуклеус», означающего ядро. Для атомов всех известных элементов установлен состав их ядер, т. е. количество содержащихся в них протонов и нейтронов. Зная этот состав, можно определить массу ядра, которая почти не отличается от массы целого атома, так как масса электронов, составляющих наружную «электронную оболочку» атома, много меньше массы ядра. При этом обнаруживается замечательное обстоятельство: массы всех атомных ядер немного меньше суммы масс составляющих их протонов и нейтронов. Этот недостаток массы называется дефектом массы ядра. Для его объяснения мы начнем с примера.

Пусть на Землю из мирового пространства падает метеорит. По мере его приближения к Земле потенциальная энергия их взаимного притяжения уменьшается, а кинетическая энергия метеорита растет (изменение кинетической энергии Земли ничтожно мало). При этом полная энергия системы Земля — метеорит остается неизменной. При ударе метеорита о Землю его кинетическая энергия превращается в тепло, которое затем отдается в мировое пространство, например в форме невидимого (инфракрасного) излучения. Это излучение уносит с собой энергию и соответствующую ей массу. Поэтому, после того как метеорит, упав на Землю, придет в состояние покоя, масса системы Земля — метеорит оказывается меньше, чем сумма масс Земли и удаленного от нее метеорита. Уменьшение массы, т. е. масса испущенного излучения, помноженная на квадрат скорости света, по закону пропорциональности энергии и массы равна кинетической энергии, накопленной метеоритом при падении и потерянной им при ударе о Землю. А эта кинетическая энергия в свою очередь равна работе силы тяжести, которая, как показывает расчет, равна произведению mgR , где m — масса метеорита, g — ускорение силы тяжести, R — радиус Земли. Поэтому изменение массы системы:

$$\Delta m = -\frac{mgR}{c^2}.$$

Легко убедиться, что уменьшение массы в этом случае ничтожно мало. Если масса метеорита равна 1 т, то, подставляя $g=981 \text{ см/сек}^2$, $R \approx 6400 \text{ км}$, получим $\Delta m \approx -6,4 \cdot 10^{-4} \text{ г}$.

Аналогичное явление, но в гораздо большем энергетическом масштабе, происходит в атомных ядрах. Протоны и нейтроны объединяются в сложные атомные ядра под влиянием особых сил притяжения, природа которых еще не вполне ясна и которые называются ядерными силами. Когда нуклон, притягиваемый

этими силами, попадает извне в ядро, система ядро — нуклон выделяет некоторую энергию, называемую энергией связи. Эта энергия как раз равна той энергии, которую нужно затратить, чтобы вырвать нуклон из ядра. Выделение энергии происходит следующим образом. Новое ядро испускает гамма-квант, либо электрон, либо позитрон, которые уносят с собой энергию, а вместе с ней уносят и массу, равную этой энергии, деленной на c^2 . Удаление этой массы и приводит к образованию дефекта массы ядра. Таким образом, дефект массы ядра равен энергии связи, выделившейся при его образовании, разделенной на квадрат скорости света. Обратно, зная из опыта дефект массы ядра и умножая его на квадрат скорости света, мы определим энергию, выделившуюся при образовании ядра. Подобные определения показали, что энергия образования ядер имеет колоссальное значение, далеко превосходящее энергетические масштабы химических процессов: горения, взрыва и т. д.

Еще до того как были осуществлены цепные и термоядерные реакции (используемые в атомных и водородных бомбах), было предположено, что источником энергии Солнца и других звезд являются ядерные превращения, происходящие в их центральных частях, где температура выше 10 000 000 градусов. Важнейшим из этих превращений является превращение основного, наиболее обильного элемента звезд — водорода в гелий. Сравнение масс атомов этих элементов показывает, что при превращении одного грамма водорода в один грамм гелия выделяется приблизительно такая же энергия, как при сгорании 20 *t* каменного угля.

Связь между энергией, массой и весом

Пропорциональность энергии и массы не следует понимать как возможность превращения массы в энергию и обратно. При таком превращении масса должна была бы уменьшаться, а энергия расти. Между тем по закону пропорциональности обе величины должны одновременно расти или одновременно уменьшаться. Когда Солнце испускает свет, то его масса уменьшается; но это отнюдь не означает, что его масса превращается в энергию. В нем происходит совсем иной процесс. Вещество Солнца частично превращается в другую форму материи, именно в материю электромагнитного поля. Эта электромагнитная материя распространяется в виде света в окружающее пространство, унося с собой часть энергии Солнца и пропорциональную часть его массы. Если бы Солнце при своем образовании состояло целиком из водорода, то при полном его превращении в гелий масса Солнца уменьшилась бы приблизительно на 0,7%, что соответствует дефекту массы гелия. Потерянная им при этом энергия была бы колоссально велика. Хотя лишь двухмиллиардная доля ее попадает на Землю, тем не менее на каждый квадратный санти-

метр ее поверхности попало бы такое количество энергии, которое эквивалентно почти 5 000 000 *t* угля.

Современная физика доказала, что все известные нам поля (электромагнитное, гравитационное, мезонное и др.) обладают энергией и пропорциональной ей массой. Таким образом, обе эти величины — энергия и масса — являются общими свойствами, присущими всем известным видам материи. Наряду с этими двумя величинами есть еще третья величина, имеющая столь же общий характер. Эта третья величина связана с весом.

Весом тела называется действующая на него в гравитационном поле сила тяжести.

Целые тела и составляющие их отдельные элементарные частицы по-разному взаимодействуют с различными полями. Взаимодействие ряда частиц (электрон, протон и т. д.) с электромагнитным полем определяется электрическим зарядом. Нейтрон лишен электрического заряда. Однако опыт показывает, что он имеет магнитный момент, обуславливающий его взаимодействие с электромагнитным полем. Взаимодействие элементарных частиц с полем ядерных сил определяется другими величинами.

Во всех этих случаях взаимодействие частицы с полем является, так сказать, двусторонним. Частица взаимодействует с полем и пассивно, т. е. так, что поле изменяет ее состояние, и активно, т. е. так, что она создает поле или изменяет состояние существующего поля. Например, в электрическом поле E частица с зарядом e испытывает силу $f=eE$, вызывающую ее ускорение.

Здесь e — есть некоторое свойство частицы — ее электрический заряд, а E — не зависящая от частицы характеристика электрического поля, называемая напряженностью поля. Физический смысл напряженности поля заключается в том, что она численно равна ускорению, испытываемому в этом поле телом единичного заряда и единичной инертной массы. Действительно:

$$f=eE=ma,$$

где a — ускорение, а m — инертная масса.

Отсюда:

$$a=\frac{e}{m}E.$$

Разные тела испытывают в данном электрическом поле различное ускорение, пропорциональное напряженности электрического поля и отношению электрического заряда к инертной массе. С другой стороны, заряженная частица создает в той системе, где она покоится, электрическое поле напряженности E' , которое на расстоянии r от частицы равно по величине $\frac{e}{r^2}$.

Таким образом, и пассивное и активное взаимодействия

частицы с электрическим полем определяются одной и той же величиной, а именно ее электрическим зарядом. То же самое имеет место и в случаях всех других известных нам полей.

Перейдем теперь к гравитационному полю. Взаимодействие тела с этим полем должно определяться особой характеристикой этого тела, которую по аналогии со случаем электрического поля можно было бы назвать гравитационным зарядом. В действительности, однако, по причинам, которые выяснятся ниже, ее называют гравитационной, или тяжелой, массой. Мы обозначим ее m_g . Гравитационная сила должна быть пропорциональна гравитационной массе тела и напряженности гравитационного поля, которое мы обозначим G :

$$f = m_g G = m_a.$$

Ускорение тела:

$$a = \frac{m_g}{m} G.$$

Отсюда видно, что напряженность гравитационного поля численно равна ускорению, испытываемому в этом поле телом с единичной гравитационной и единичной инертной массами. В общем случае ускорение разных тел в данном гравитационном поле пропорционально отношению этих масс.

Галилей установил следующий факт, представляющий собой одно из наиболее замечательных и глубоких открытий физики: все тела испытывают в данном гравитационном поле одинаковое ускорение.

Это означает, согласно последней формуле, что m_g пропорционально m :

$$m_g = Km,$$

где K — одинаковый для всех тел множитель, так что $a = KG$, т. е. что взаимодействие тела с гравитационным полем (и пассивное и активное) целиком определяется инертностью тела. Два явления — гравитация и инерция, на первый взгляд не имеющие ничего общего, оказываются в действительности глубоко связанными.

Обычно выбирают такую систему единиц, в которой $K=1$, т. е. гравитационная масса равна инертной. Поэтому обе эти массы не различаются и употребляется один термин — масса, для характеристики как инертных, так и гравитационных свойств тел.

В этой системе единиц ускорение тел в гравитационном поле $a=G$, т. е. численно равно напряженности гравитационного поля, а вес $f=mG$, т. е. произведению массы на ускорение силы тяжести.

Ускорение G на Земле обычно обозначается g .

Современная теория тяготения показала, что пропорциональность гравитационной и инертной массы имеет место не только для отдельных частиц и состоящих из них тел, но и для всех известных физических полей — электромагнитного, мезонного и т. д.

Таким образом, инертная масса, гравитационная масса и энергия представляют собой три свойства, присущие всем известным нам видам материи.

Одним из важнейших выводов физической науки является установление пропорциональности этих трех величин. Их пропорциональность делает возможным использовать каждую из них в качестве меры «количества материи».

В ряде физических процессов, связанных с превращением материи из одних видов в другие, понимание явлений облегчается, если ввести понятие о «количестве материи». Это понятие условно, потому что в действительности материя есть отвлеченное качественное понятие и различные количественные свойства присущи лишь отдельным конкретным ее проявлениям.

ЛИТЕРАТУРА

А. Эйнштейн. — Сущность теории относительности. Пер. с англ. М. Изд.-во иностранной литературы. 1955.

А. Эйнштейн и Л. Инфельд. — Эволюция физики. Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квант. Пер. с англ. Изд. 2-е М. Гостехиздат. 1956.

Б. Г. Кузнецов. — Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии. М. Изд.-во Академии наук СССР. 1957.

В. А. Фок. — Теория пространства, времени и тяготения. М. Гостехиздат. 1955.

В. А. Фок. — Современная теория пространства и времени. «Природа», № 12, 1953.

П. Г. Бергман. — Введение в теорию относительности. С предисл. А. Эйнштейна. М. Изд.-во иностранной литературы. 1947.

В. Павли. — Теория относительности. Перев. с немецк. М.—Л. Гостехиздат. 1947.

М. Ф. Широков. — Теория относительности. «Наука и жизнь» № 8, 1954.

Л. Инфельд. — От Коперника до Эйнштейна. «Вопросы философии», № 4, 1955.

Я. А. Смородинский. — Альберт Эйнштейн и его значение в развитии физики. «Природа», № 6, 1956.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

I. Эволюция представлений о пространстве, времени и движении	5
Относительность движения в классической механике	5
Относительность движения и электромагнитное поле	8
Основные понятия теории относительности	13
II. Простейшие выводы теории относительности	15
Относительность длин	15
Относительность промежутков времени	18
Путешествие во времени	19
Путешествие к звездам	21
Интервал	22
Относительность траекторий	24
Сложение скоростей	25
Эффект Доплера	26
III. Некоторые применения теории относительности в физике	28
Инертная масса	28
Энергия	30
Дефект массы	32
Связь между энергией, массой и весом	34

☆ К ЧИТАТЕЛЯМ ☆

Издательство «Знание» Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний просит присылать отзывы об этой брошюре по адресу: Москва, Новая площадь, д. 3/4.

☆

Автор
Лев Эммануилович Гуревич

Редактор И. Б. Файнбойм
Техн. редактор М. И. Губин
Корректор Г. М. Бауэр

А05593. Подп. к печ. 29/VI 1957 г. Тираж 50000 экз. Изд. № 59
Бумага $60 \times 92^{1/16}$ — 1,25 бум. л. — 2,5 п. л. Учетно-изд. 2,18 л. Заказ № 318

Министерство культуры СССР. Главное управление полиграфической промышленности. Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова
Москва, Ж-54, Валовая, 28.

