

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

В.И. БАРСУКОВ

ФИЗИКА

ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ
ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Конспект лекций

Тамбов 2010

УДК 535. 338 (0765)
ББК В 36 я 73-5
Б261

Р е ц е н з е н т :

Доктор технических наук, профессор
В. Ф. Першин

А в т о р - с о с т а в и т е л ь
В.И. Барсуков

Б261 Физика. Элементы специальной теории относительности.: конспект лекций / авт.-сост. В.И. Барсуков. Тамбов : Тамбовский государственный технический университет. Изд-во «ООО Центр-пресс», 2010. 44 с.

Предлагаемое учебное издание представляет собой конспект лекций по одному из разделов курса общей физики, читаемого в соответствии с Государственным стандартом для высших технических учебных заведений.

Предназначено для студентов первых или вторых курсов всех специальностей инженерного профиля дневного и заочного отделений.

УДК 535. 338 (0765)
ББК В36я 73-5

Тамбовский государственный
технический университет

Издательство «ООО Центр-пресс», 2010.

ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Классическая механика базировалась на вполне определённых взглядах на пространство и время. Эти взгляды носили априорный характер, т.е. они постулировались до и независимо от опыта. Экспериментальное исследование свойств пространства и времени началось в конце XIX столетия в связи с решением вопроса о природе света. Логическим завершением этих исследований явилась теория относительности, созданная А. Эйнштейном в 1905 – 1916 гг.

Теория относительности – это современная теория пространства и времени. Вместе с квантовой механикой теория относительности образует теоретический фундамент современной физики.

Теория относительности включает в себя специальную (частную) и общую теории. Первая рассматривает свойства пространства и времени в инерциальных системах отсчёта в отсутствие полей тяготения, вторая свойства пространства и времени в неинерциальных системах при наличии полей тяготения.

Ниже будут рассмотрены некоторые элементы специальной теории относительности.

1 ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ О ПРОСТРАНСТВЕ, ВРЕМЕНИ И ДВИЖЕНИИ

В основе классической механики лежат следующие представления о пространстве, времени и движении.

1. *Пространство, в котором происходят все физические явления и процессы, абсолютно.*

Абсолютное пространство – это некое неподвижное, безграничное, пустое «вместилище» материи.

«Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему и остаётся всегда одинаковым и неподвижным» (И. Ньютон. «Математически начала натуральной философии»).

Свойство абсолютного пространства не зависят от того, есть в нём материальные тела или нет, движутся эти тела или покоятся.

Абсолютное пространство *трёхмерно*. Это значит, что оно имеет *три измерения* и для определения положения каждой его точки необходимо задать три числа, три координаты.

Абсолютное пространство *непрерывно*. Координаты, определяю-

щие положение отдельных его точек, могут принимать любые согласованные значения. (Координаты должны быть согласованы в том смысле, что они должны образовывать *вектор*. Как известно, не всякая тройка чисел образует вектор.)

Абсолютное пространство эвклидово. Это значит, что геометрические свойства абсолютного пространства, его метрика описываются геометрией Эвклида. Определить метрику пространства – значит указать способ задания расстояния между произвольными точками этого пространства. Формула, выражающая квадрат расстояния между какими – либо двумя точками, называется фундаментальной квадратичной формой. Фундаментальная форма эвклидова пространства имеет вид:

$$\Delta r^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2, \quad (1.1)$$

$$\Delta x = x_2 - x_1;$$

$$\text{где } \Delta y = y_2 - y_1;$$

$$\Delta z = z_2 - z_1;$$

x_1, y_1, z_1 – декартовы координаты одной точки x_2, y_2, z_2 – декартовы координаты другой точки; Δr – расстояние между этими точками.

Расстояние между отдельными точками пространства измеряются при помощи *масштабов* (линеек), изготовленных из твердых тел. Постулируется (без опытной проверки): если два масштаба имеют одинаковую длину в одной системе отсчёта, то они будут иметь одинаковую длину, равную исходной, и во всех других системах, независимо от того, где будут находиться масштабы и как двигаться.

Абсолютное пространство *однородно*: в нём нельзя выделить особых, привилегированных точек, которые могли бы послужить началом привилегированных систем координат.

Абсолютное пространство *изотропно*: в нём не существует особых, привилегированных направлений, все его направления равноправны. То, что абсолютное пространство однородно и изотропно, означает, что оно является пространством «плоским», неискривленным.

(Искривленное пространство (таковым является, например, пространство, в котором имеется поле тяготения) описывается иной, неэвклидовой геометрией.)

2. Время абсолютно.

Время – это некое абсолютное «вместилище» событий, абсолютная длительность, не зависящая от тел. «Абсолютное, истинное или математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему – либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью» (Ньютон).

Абсолютное время - это время, не зависящее от выбора пространственной системы координат; время, протекающее единообразно, с одной и той же быстротой во всех системах отсчёта; время, любое мгновение которого наступает одновременно во всех системах отсчёта, во всех точках Вселенной.

Абсолютное время *одномерно*, для его определения необходимо задать одно – единственное число – временную координату t .

Время *непрерывно*: два его мгновения могут быть сколь угодно близки друг к другу.

Абсолютное время *однородно*: в нём нельзя выделить особого мгновения, которое могло бы послужить началом привилегированной системы отсчета времени.

В отличие от абсолютного пространства абсолютное время *анизотропно*: оно не обладает способностью движения сначала в одном направлении, а затем в противоположном: время монотонно течёт только в одном направлении – от прошлого к будущему.

Измерение времени осуществляется при помощи *часов*. Роль часов может играть любой периодически повторяющийся процесс. Постулируется: если двое одинаковых часов однажды синхронизированы (выверены), то их показания в последующем будут одинаковыми, независимо от того, где будут находиться часы и как двигаться.

Абсолютное время и абсолютное пространство не взаимосвязаны. Это означает что вполне допустимо описание физических явлений в чисто пространственном аспекте (т. е. только в пространстве, *вне времени*).

3. Наряду с движением *относительным*, т.е. движением тел друг относительно друга, существует движение *абсолютное* – движение по отношению к абсолютному пространству. Это движение, правда, нельзя засечь механическими опытами (это следует из механического принципа относительности Галилея), но не исключено, что его удастся обнаружить какими – либо другими, немеханическими опытами.

(Обратим внимание на то, что абсолютное пространство Ньютона не содержит абсолютно неподвижного материального тела, к которому можно было бы привязать абсолютные координатные оси.

Лишь через два столетия после Ньютона физика пыталась отнести абсолютное движение к абсолютно неподвижному материальному телу – эфиру.)

4. Свойства пространства и времени естественным образом отражаются в экспериментально установленных законах движения материи. Так, *однородность пространства* находит своё отражение в законе инерции, обобщением которого является *закон сохранения импульса*.

Действительно, если пространство однородно, если все его точки равноправны, то поведение движущегося свободного тела в одной точке траектории, по которой оно движется, ничем не будет отличаться от поведения в другой точке - пространство как таковое не может изменить скорость и импульс тела, следовательно, тело сохраняет приобретенный импульс.

Благодаря однородности пространства равноправны с механической точки зрения все свободные тела и, следовательно, все инерциальные системы отсчёта.

Однородность времени проявляется в *сохранении энергии*. Время само по себе не может вызвать изменение физического состояния замкнутой системы. Энергия замкнутой системы тел с течением времени не изменяется.

Анизотропность времени проявляется в том, что процессы, самопроизвольно развивающиеся в замкнутых системах, имеют вполне определенную *направленность* (об этом речь пойдет в разделе «Термодинамика»).

Таким образом, не пространство и время как таковые, а взаимодействие тел друг с другом изменяет их состояние, их движение, изменяет направленность протекающих в природе процессов.

5. Инерциальных систем отсчёта существует бесконечное множество. Если какая – либо из систем инерциальна, то инерциальными будут любые другие системы, движущиеся по отношению к этой системе равномерно и прямолинейно.

2 ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАЛИЛЕЯ.

1. «Все механические явления при одинаковых условиях протекают неотличимо одинаково во всех инерциальных системах отсчёта».

«Не выходя за пределы движущейся системы, нельзя зарегистрировать её прямолинейное и равномерное движение». «При описании механического движения все инерциальные системы отсчёта равноправны». Все эти утверждения, являющиеся следствием однородности пространства, - формулировки классического принципа относительности Галилея.

2. Принцип относительности Галилея формулируют также как требование инвариантности (неизменности) законов механического движения относительно преобразований Галилея. Напомним о том, что преобразованиями называются формулы, связывающие координаты и время некоторого события (событием называется любое явление, ха-

рактирующее место свершения (координатами) и временем свершения) в двух инерциальных системах от счёта, находящихся в относительном движении.

В основе преобразований Галилея лежат классические представления о пространстве и времени. Как было показано ранее, преобразования Галилея имеют вид:

<p>а) переход от системы O к системе O'</p> <p>$(O \rightarrow O')$:</p> $\begin{aligned} x' &= x - \vartheta t \\ y' &= y; \\ z' &= z; \\ t' &= t; \end{aligned}$	<p>б) переход от системы O' к системе O</p> <p>$(O' \rightarrow O)$:</p> $\begin{aligned} x &= x' + \vartheta t \\ y &= y'; \\ z &= z'; \\ t &= t'; \end{aligned} \quad (2.1)$
---	---

где x, y, z, t и x', y', z', t' – координаты и время одного и того же точечного события в системах O и O' . Преобразования записаны для случая, когда система O условно считается «неподвижной», система

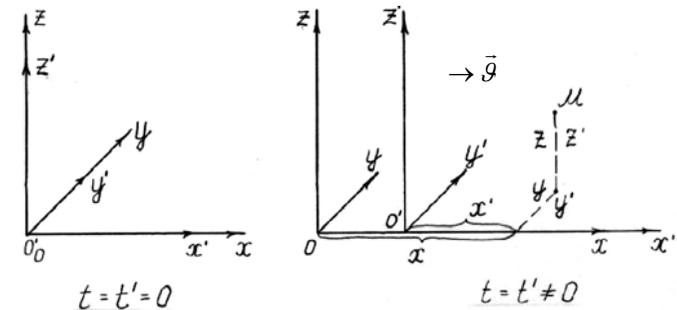


Рис.1

O' - «движущейся»; движение системы O' происходит со скоростью $\bar{\vartheta} = \text{const}$ в направлении оси x без поворота осей y' и z' ; в момент времени $t = t' = 0$ начала координат и направления всех координатных осей совпадают (рис.1). Далее всюду без особых оговорок, символ « O » будет обозначать «неподвижную» инерциальную систему, символ « O' » - «движущуюся» инерциальную систему.

Кавычки в словах «неподвижная» и «движущаяся», отражающие условность деления этих систем на движущуюся и покоящуюся, будут опускаться. Во всех случаях будет рассматриваться простейший случай относительного движения систем – в направлении оси x .

3. Из преобразований (2.1) вытекает правило сложения скоростей в классической механике. Для простейшего случая, когда материальная точка движется параллельно оси x , это правило таково:

$$\begin{array}{ll} \text{переход } 0 \rightarrow 0' & \text{переход } 0' \rightarrow 0 : \\ u' = u - v; & u = u' + v, \end{array} \quad (2.2)$$

где u – скорость точки в системе 0 ; u' – скорость точки в системе $0'$.

Таблица 1

Относительные (неинвариантные) величины и соотношения	Абсолютные (инвариантные) величины и соотношения
Координаты (пространственное положение тел)	Масса
Траектория движения	Ускорение
Скорость тела относительно системы отсчёта	Сила
Начальные условия (координаты и скорость тела в начальный момент времени)	Законы Ньютона
Механическая энергия	Ход времени и промежутки времени
Импульс	Расстояние между точками
Момент импульса	Относительная скорость (скорость двух тел друг относительно друга)
Скорость света	Одновременность событий Геометрическая форма тела (конфигурация системы) Максимальная скорость распространения взаимодействий (равна бесконечности)

4. Из принципа относительности Галилея и правила сложения скоростей (2.2) следует, что *взаимодействие тел на расстоянии должно распространяться мгновенно* (принцип дальнего действия). Действительно, если бы скорость распространения взаимодействия была конечной, то, как видно из формулы (2.2), она была бы разной в разных системах отсчета. Следовательно, можно было бы различать эти системы, что противоречит принципу относительности Галилея.

5. Пользуясь преобразованиями Галилея, можно показать, что целый ряд понятий, величин и соотношений механики зависят от выбора системы отсчёта, т. е. являются *относительными*; другие же величины и соотношения не зависят от выбора системы отсчёта – являются *абсолютными*, инвариантными. Инвариантность некоторых величин относительно преобразований Галилея была рассмотрена ранее. В приведенной таблице 1 неинвариантные величины и соотношения перечислены в одном столбце, инвариантные – в другом.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. То, что классическая механика признает существование абсолютного движения в принципе, но вместе с тем отвергает возможность обнаружить его механическими опытами, настораживает. Естественно поэтому, что при первом же удобном случае были предприняты попытки обнаружить абсолютное движение тел другими, немеханическими методами. Это было сделано в конце XIX столетия при помощи *оптических опытов*.

2. Кратко – о волновой теории света.

Волновая теория света (выдвинута Х. Гюйгенсом) в XVII в. основывалась на представлении о существовании материального светового носителя – *эфира*. Первоначально эфир мыслился как некая механическая среда, заполняющая всё пространство, «пропитывающая» все тела (механический эфир). Свет по Гюйгенсу – *упругие поперечные волны механического эфира*. (Чтобы свет действительно мог распространяться в эфире в виде механических волн, эфир должен обладать исчезающе малой плотностью и невообразимо большой упругостью.)

Создание Д.К. Максвеллом электромагнитной теории света (вторая половина XIX столетия) привело к представлению об электромагнитном эфире. Электромагнитный эфир в теории Максвелла – всепроникающая, неподвижная (вне тел) электромагнитная среда. Свет по Максвеллу – *поперечные колебания электромагнитного эфира*.

3. Возникает вопрос: взаимодействуют ли движущиеся тела с эфиром? Увлекают ли находящийся в них эфир? Если увлекают, то насколько – полностью или частично? Были выдвинуты различные гипотезы. По Г. Р. Герцу (Германия) эфир увлекается полностью, по А. Физо (Франция) – частично, по Г. А. Лоренцу (Голландия) – не увлекается вовсе.

4. Остановимся на последнем предположении – на модели неподвижного эфира.

Если эфир абсолютно неподвижен, его можно рассматривать как абсолютную систему отсчёта; тогда движение тел относительно эфира – абсолютное движение. Существование эфира, а следовательно, и абсолютного движения будет доказано, если удастся на опыте обнаружить движение тел относительно эфира. Такими телами могут быть, к примеру, источники света. Так как свет – колебания эфира, то скорость света относительно самого эфира не зависит от того, движется источник света в эфире или нет. Относительно же источника скорость света должна быть разной в зависимости от того, движется или покоится в эфире этот источник: если источник покоится, свет, испущенный этим источником, относительно источника должен распространяться с одной и той же скоростью *по всем направлениям*, если же источник движется, скорость света в разных направлениях должна быть разной. Образно говоря, при движении тел в эфире должен возникать «эфирный ветер».

Обозначим: \vec{c} – скорость света относительно эфира (скорость света относительно абсолютной системы отсчета); \vec{v} – скорость источника света относительно эфира (абсолютная скорость источника, скорость движущейся инерциальной системы, скорость «эфирного ветра»); \vec{u}' – скорость света относительно источника (скорость света относительно движущейся системы отсчета). Тогда (если только классическое правило сложения скоростей Галилея для света справедливо) должно быть: $\vec{u}' = \vec{c} - \vec{v}$.

Проверка справедливости этого соотношения, определение u' и v – дело эксперимента.

5. Опыт по определению абсолютного движения Земли впервые осуществил А.А. Майкельсон (США) в 1881 г. Идея этого опыта состояла в следующем.

Два луча света посылались в двух взаимно перпендикулярных направлениях: один – в направлении орбитального движения Земли, другой – перпендикулярно к этому направлению (рис.2). Определялись скорости света u'_1 и u'_2 (относительно Земли) вдоль этих направлений. Так как в направлении орбитального движения Земли источник света двигался, а в направлении, перпендикулярном ему, – был неподвижен, то ожидалось, что скорости u'_1 и u'_2 будут различными (скорость u'_1 должна быть меньше u'_2 , так как эфир движется навстречу Земле).

Что же оказалось в действительности?

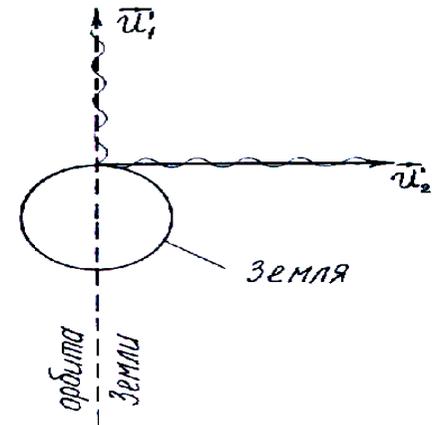


Рис.2

В действительности оказалось, что скорости u'_1 и u'_2 одинаковы, и, следовательно, никакого «эфирного ветра» не существует.

6. Несостоятельными оказались и гипотезы полностью и частично увлекающегося эфира. Они также противоречили опытным фактам.

7. Таким образом, все попытки обнаружить на опыте абсолютной системы отсчета потерпели крах. В итоге физика была вынуждена отказаться от некоторых своих положений, казавшихся ей устоявшимися и очевидными.

1) Так как абсолютное движение тел невозможно обнаружить ни механическим, ни оптическим (электродинамическими) опытами (Другие типы взаимодействия к началу XX столетия известны не были.), его вообще не существует. Понятия абсолютного движения и абсолютного покоя лишены смысла. Можно говорить лишь об относительном движении и об относительном покое тел.

2) Отсутствие «эфирного ветра» в любых системах отсчёта лишает смысла само понятие эфира как реальной материальной среды. Не существует, следовательно, неподвижных в абсолютном смысле привилегированных систем отсчёта.

3) Свет независимо от состояния движения источника распространяется по всем направлениям и во всех системах отсчёта изотропно – с одной и той же скоростью. Правило сложения скоростей, установленное классической механикой, для света не выполняется! Скорость света не складывается ни с какой другой скоростью. Свет проходит с одной и той же скоростью и мимо «неподвижного» тела, и мимо тела, движущегося навстречу свету, и мимо тела, которое свет догоняет.

4 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ПОСТУЛАТЫ ЭЙНШТЕЙНА)

1. Новая теория пространства и времени - специальная теория относительности – принимает без изменения некоторые положения старой теории, а именно:

- а) положение о справедливости геометрии Эвклида в пространстве, свободном от полей тяготения;
- б) закон инерции;
- в) принцип относительности (в обобщенной форме)

То, что специальная теория относительности сохраняет в качестве одного из основных своих положений принцип инерции, означает, что она так же, как и классическая теория, основывается на представлениях об однородности пространства. Но в отличие от старой теории, рассматривающей идею об однородности пространства в отрыве от идеи об однородности времени (доказательством этого служит полная самостоятельность в классической физике законов сохранения импульсов и энергии), теория относительности объединяет эти две идеи в одну – идею об однородности единого пространственного – временного мира.

2. Обобщенную формулировку принципа относительности называют *первым постулатом теории Эйнштейна*. Вот некоторые его равноправные формулировки: «никакими физическими опытами, проведенными внутри инерциальной системы отсчёта, невозможно установить, покоится ли эта система или равномерно и прямолинейно движется»; «не существует особых, привилегированных, абсолютных инерциальных систем отсчёта; все инерциальные системы равноправны»; «законы природы инвариантны относительно перехода от одной системы отсчёта к другой».

3. К перечисленным положениям добавляется принцип постоянства скорости света (*второй постулат специальной теории относительности*): «скорость тела в вакууме не зависит от скорости движения источника, она одинакова во всех инерциальных системах отсчёта».

Принцип постоянства скорости света иначе называют принципом существования предельной скорости распространения взаимодействий. Теория относительности, опираясь на *опыт*, отвергла утверждение классической механики о возможности существования взаимодействий, распространяющихся с бесконечно большой скоростью (классическая механика полагала, например, что гравитационное взаимодействие тел передается мгновенно, с бесконечно большой скоростью). Теория относительности утверждает, что скорость распространения любых взаимодействий *конечна* (примерно 300000 км/сек - с такой скоростью рас-

пространяются в вакууме электромагнитное, гравитационное и ядерное взаимодействия). В настоящее время есть все основания думать, что существование предельной скорости распространения взаимодействий связано непосредственно со свойствами пространства и времени, а не с физической природой взаимодействия.

5 ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА

1. Преобразования Галилея несовместимы с постулатами Эйнштейна. Так, к примеру, из преобразований Галилея следует, что скорость распространения света в разных системах отсчета должна быть разной, в то время как по второму постулату она должна быть одинаковой во всех системах.

2. Преобразования, в основе которых лежат постулаты специальной теории относительности, называются преобразованиями Лоренца.

Какими должны быть эти преобразования (с точки зрения вида зависимости между «штриховыми» и «нештриховыми» величинами)? Из полного равноправия всех инерциальных систем отсчета, из однородности пространства и времени следует, что зависимость между «штриховыми» и «нештриховыми» величинами может быть только *линейной*. Любая другая зависимость означала бы неравноправие системы. Что означала бы, к примеру, квадратичная зависимость между x' и x ?

То, что прямые формулы перехода содержали бы степени, а обратные – корни. Одно это уже означает, что системы чем–то отличаются друг от друга. Правильные преобразования не должны изменять характер движения тел: равномерное прямолинейное движение должно остаться таковым во всех инерциальных системах. А это возможно только в том случае, если преобразования координат и времени – линейны.

Так как и галилеевы, и лоренцевы преобразования – линейные, отличие их друг от друга заключается только в том, что у них разные коэффициенты пропорциональности:

$$\begin{aligned} x' &= x - \vartheta t \\ x &= x' + \vartheta t' \end{aligned} \quad \text{по Галилею} \quad (5.1)$$

(коэффициент пропорциональности равен единице);

$$\begin{aligned} x' &= \alpha(x - \vartheta t) \\ x &= \alpha(x' + \vartheta t) \end{aligned} \quad \text{по Лоренцу} \quad (5.2)$$

Коэффициент пропорциональности α должен отражать принцип постоянства скорости света. Пусть x' и x обозначают расстояния, на которые сместится за некоторое время фронт световой волны вдоль «иксовых» осей в системах 0 и $0'$. Тогда $x' = ct'$ и $x = ct$. Подста-

вив в формулы (5.2) вместо x' и x соответственно ct' и ct , получим:

$$\begin{aligned} ct' &= \alpha(ct - \vartheta t); \\ ct &= \alpha(ct' + \vartheta t'). \end{aligned}$$

Исключив из этих уравнений t' и t (проделайте это самостоятельно), найдем α :

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}. \quad (5.3)$$

Подставив выражение для α в (5.2), найдем формулы, связывающие x' и x :

переход $0 \rightarrow 0'$: переход $0' \rightarrow 0$:

$$x' = \frac{x - \vartheta t}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} \quad (5.4^*) \quad x = \frac{x' + \vartheta t'}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} \quad (5.4)$$

3. Аналогично для координат y' и y можно записать:

$$y' = \beta y \quad \text{и} \quad y = \beta y'$$

Перемножим обе формулы: $y'y = \beta^2 y y'$

Сократив обе части этого равенства на $y y'$, найдем, что $\beta = \pm 1$.

Знак «плюс» соответствует одинаковому направлению осей y' и y , знак «минус» - противоположному. В рассматриваемом нами случае системы $0'$ и 0 имеют одинаковые направления осей, так что $\beta = 1$ и, следовательно,

$$y' = y \quad \text{и} \quad y = y'. \quad (5.5)$$

И, наконец, координаты z и z' преобразуются по закону:

$$z' = z \quad \text{и} \quad z = z'. \quad (5.6)$$

4. Для того чтобы найти связь между t' и t , решим уравнения (5.4 *) и (5.4) совместно. Сделаем в уравнении

$$x = \frac{x' + \vartheta t'}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}.$$

подстановку $x' = \frac{x - \vartheta t}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}$, получим: $x = \frac{x - \vartheta t}{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}} + \frac{\vartheta t'}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}.$

Приведем к общему знаменателю обе части этого уравнения:

$$x - \frac{\vartheta^2}{c^2}x = x - \vartheta t + \vartheta t' \sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}},$$

откуда
$$t' = \frac{t - \frac{\vartheta}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}. \quad (5.7^*)$$

Аналогично для t получается выражение:

$$t = \frac{t' + \frac{\vartheta}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}. \quad (5.7)$$

Формулы (5.4*) - (5.7) называются преобразованиями Лоренца.

5. При $\vartheta \ll c$ преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея. Преобразования Галилея, следовательно, - не что иное, как предельный случай более общих преобразований, случай, пригодный для медленных по сравнению со скоростью света движений.

При $\vartheta > c$ преобразования Лоренца теряют физический смысл (скорости, превышающие скорость света в вакууме, невозможны).

Особое внимание следует обратить на формулы преобразования времени. В этих формулах нашло свое отражение одно из самых важных открытий теории относительности: время носит не абсолютный, а относительный характер, оно зависит от выбора пространственной системы отсчета. Пространство и время существуют в неразрывном единстве, они неотделимы друг от друга. *Пространственно-временные величины относятся только к материальным объектам.* Без этого они лишены всякого физического смысла.

6. Скорости, соизмеримые со скоростью света, называются *релятивистскими*. Формулы и соотношения, в которых величина $\frac{\vartheta^2}{c^2}$ играет существенную роль, также следует называть релятивистскими.

6 СЛЕДСТВИЯ ИЗ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ЛОРЕНЦА

Из преобразований Лоренца вытекает ряд следствий, совершенно необычных с точки зрения представлений классической механики и нашего житейского опыта. Рассмотрим некоторые из этих следствий.

I Изменение размеров движущихся тел
(лоренцево сокращение)

1. Пусть некоторый стержень, расположенный параллельно осям x' и x , покоится относительно системы O' (рис.3).

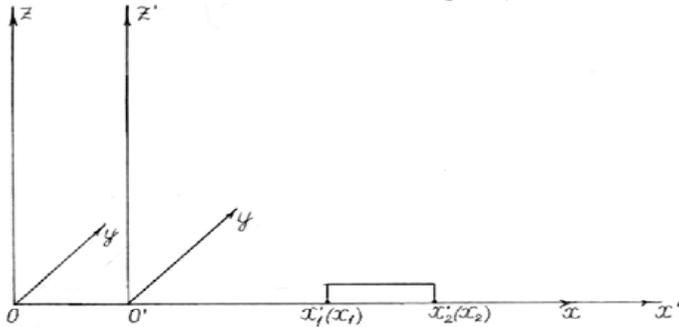


Рис.3

Обозначим длину стержня в системе O' через l_0 и назовем её собственной длиной стержня. Если координаты концов стержня в этой системе x'_1 и x'_2 , то

$$l_0 = x'_2 - x'_1. \quad (6.1)$$

Относительно системы O стержень движется со скоростью ϑ (с такой скоростью система O' движется относительно O). Чтобы найти длину стержня l в системе O (длину движущегося стержня), надо определить координаты его концов в один и тот же момент времени t , зафиксированный по часам системы O (Часы системы O или O' - часы, неподвижные относительно этой системы). Пусть эти координаты равны соответственно x_1 и x_2 .

Тогда
$$l = x_2 - x_1 \quad (6.2)$$

Чтобы найти связь между l и l_0 , надо использовать ту из формул преобразования координат, в которую входят x' , x и t , т.е. (5.4). Согласно этой формуле:

$$x_2 = \frac{x'_2 - \vartheta t}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}, \quad x_1 = \frac{x'_1 - \vartheta t}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}.$$

Вычитая, получим:
$$x_2 - x_1 = \frac{x'_2 - x'_1}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}.$$

Но в соответствии с (6.1) и (6.2) $x'_2 - x'_1 = l_0$, а $x_2 - x_1 = l$

Следовательно,

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{или} \quad l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (6.3)$$

Таким образом, длина стержня l , измеренная в системе, в которой стержень движется, оказывается меньше длины l_0 , измеренной в системе, относительно которой он покоится. Происходит сокращение длины, называемое лоренцевым сокращением.

2. Длины l_0 и l можно понимать также как длины одного и того же стержня, измеренные в одной и той же системе отсчета в двух случаях: а) когда стержень покоится относительно системы отсчета (собственная длина l_0); б) когда он движется относительно нее со скоростью v (длина l).

3. При движении тел сокращаются только продольные размеры; размеры, перпендикулярные к направлению движения, остаются неизменными (легко видеть из преобразований координат, что разности $y'_2 - y'_1$ и $y_2 - y_1$, $z'_2 - z'_1$ и $z_2 - z_1$, определяющие поперечные размеры тела в системе O' и O , одинаковы).

4. Обратим внимание на то, что лоренцево сокращение – эффект чисто кинематический: никакими внутренними напряжениями в телах это сокращение не сопровождается. Лоренцево сокращение, далее, является относительным, взаимным. Поясним сказанное. Возьмем два стержня A и B , одинаковой длины l_0 . Приведем их в движение с относительной скоростью v . Пусть с каждым из стержней движется наблюдатель. Попросим этих наблюдателей измерить длину «своего» и «чужого» стержня. Первый наблюдатель (движущийся со стержнем A) скажет после измерения, что длина «его» стержня равно l_0 , а «чужого»

- $l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, т.е. для него стержень A длиннее B .

Второй наблюдатель, напротив, найдет длину «своего» стержня (B), равной l_0 , а «чужого» (A) - $l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ т.е. для этого наблюдателя стержень A будет короче B . Кто же прав? Правы оба наблюдателя,

ибо результаты измерения зависят от выбора системы отсчёта, в которой производятся измерения.

5. Так как размеры тел в направлении, перпендикулярном к скорости, не изменяются, то объём тела в системе 0 (объём движущегося тела V) связан с объёмом в системе $0'$ (объём неподвижного тела V_0) соотношением:

$$V = V_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (6.4)$$

6. Таким образом, теория относительности приводит к выводу, что понятия длины, площади и объёма являются не абсолютными, как это считала классическая механика, а относительными. Утверждение, что расстояние между какими-либо двумя точками равно l , - бессмысленно, если не указана система отсчёта, к которой эта величина отнесена. Бессмысленно так же спрашивать, какая длина «истинная», какая – «кажущаяся». Все длины, полученные в разных системах отсчета, одинаково реальны, одинаковы истинны. Трудность понимания относительного характера длины или объёма – исключительно в нашей консервативной привычке считать эти понятия абсолютными.

II Относительность временных интервалов

1. Из преобразований Лоренца следует, что время течет по-разному в различных системах отсчёта. Если это так, то продолжительность одного и того же процесса в разных системах отсчёта должна быть разной.

Пусть в точке (x', y', z') некоторого тела, неподвижного относительно системы $0'$, происходит какой-либо физический процесс. С телом жестко скреплены часы T' (эти часы одновременно являются часами системы $0'$, так как тело покоится в этой системе). За ходом процесса, происходящего в теле, следит наблюдатель, находящийся в системе 0 . У наблюдателя есть свои часы T (эти часы можно считать часами системы 0 , поскольку наблюдатель неподвижен относительно этой системы). С точки зрения наблюдателя часы T будут неподвижными, часы T' - движущимися. Наблюдатель фиксирует по этим двум часам начало и конец процесса. Началу и концу процесса по часам T' соответствуют моменты t'_1 и t'_2 , по часам T - t_1 и t_2 . Продолжительность процесса по часам T' равна:

$$\Delta t_0 = t'_2 - t'_1, \quad (6.5)$$

по часам T : $\Delta t = t_2 - t_1$ (6.6)

Чтобы сопоставить Δt_0 и Δt , надо из двух формул преобразования времени (5.7*) и (5.7) выбрать ту, в которую входят x', t' и t . Такой формулой является (5.7). По этой формуле:

$$t_2 = \frac{t'_2 + \frac{g}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}} \quad \text{и} \quad t_1 = \frac{t'_1 + \frac{g}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}}.$$

Вычитая, найдём:

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}} \quad \text{или, учитывая (6.5) и (6.6),}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}} \quad \text{и} \quad \Delta t_0 = \Delta t \sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}} \quad (6.7)$$

Так как $\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}} < 1$, то $\Delta t_0 < \Delta t$.

Таким образом, наблюдатель, связанный с системой O , зафиксирует, что продолжительность процесса в системе O' меньше, чем в O . Движущиеся часы идут медленнее неподвижных, они отстают от неподвижных часов: за время, пока какая-либо из стрелок неподвижных часов T совершит один полный оборот, такая же стрелка часов T' совершит только часть оборота.

2. Замедление хода времени в движущихся системах отсчёта отражается на всех без исключения процессах. Если, к примеру, наблюдать со стороны за космическим кораблем, движущимся равномерно с очень большой скоростью, то первое, что бросится в глаза, - это замедленный характер всего происходящего в корабле. Движение космонавта, его пульс, дыхание, быстрота реакции и т.д. - все будет выглядеть замедленным. Но если космонавту сообщить (по радио, например), что он стал чересчур медлительным, что у него совершенно ненормальный пульс, скажем всего 10 ударов в минуту, то он с этим не согласится. Он возьмёт свои часы и найдёт, что за его, космическую минуту пульс делает нормальное число ударов (60). И всё остальное космонавт найдёт

совершенно нормальным, обычным; словом, ничто происходящее в корабле не подскажет ему, что его время течёт медленнее и что его корабль движется (в противном случае можно было бы определить абсолютную скорость корабля). Замедление времени в корабле может обнаружить только наблюдатель, находящийся в другой системе отсчёта, по отношению к которой корабль движется. То, что сторонний наблюдатель и космонавт, наблюдая за одним и тем же процессом (биение сердца космонавта, например), производя измерения, придут к разным выводам, означает, что ход времени в той или иной физической системе (в космическом корабле, в частности) воспринимается по-разному разными наблюдателями; результат измерения времени зависит от системы отсчёта, в которой время измеряется.

Если бы, в свою очередь, космонавт взялся считать чужой пульс по своим часам, то он нашел бы этот пульс тоже неравномерным: за 1 минуту (по часам космонавта) пульс ударил бы не 60 раз, а только 10. Сверяя свои и чужие часы, космонавт обнаружил бы замедление хода чужих часов. Такое «странное», на первый взгляд, поведение часов совершенно естественно, оно выражает один и тот же факт: в любой системе отсчёта движущиеся часы идут медленнее неподвижных. Замедление времени, как и сокращение длин, носит относительный, а не абсолютный характер. Именно в этой относительности сокращение длин и замедление времени проявляется полное равноправие всех инерциальных систем отсчёта.

3. Время Δt_0 , измеренное часами, скрепленными с телом, называется *собственным временем* этого тела. Время Δt , измеренное часами, скрепленными с системой отсчёта, относительно которой движется тело, называется *координатным временем этого тела*. Как видно из формулы (6.7), собственное время всегда меньше или, по крайней мере, равно координатному (первое относится к случаю, когда тело в рассматриваемой системе отсчёта движется, второе – когда оно покоится).

Собственное время инвариантно относительно преобразований Лоренца. Действительно, это время фиксируется в системе отсчёта, связанной только с самим телом, следовательно, оно не зависит от выбора системы, относительно которой движется тело.

4. Замедление хода времени в движущихся системах отсчёта подтверждено экспериментально. Рассмотрим одно из таких подтверждений.

Среди элементарных частиц есть частицы, называемые μ - мезонами, или кратко, мюонами. Это нестабильные, быстро распадающиеся частицы, занимающие по массе промежуточное положение между

электронами и протонами. В естественных условиях мюоны рождаются в космических лучах на высоте порядка 20 км над Землей, но они могут быть получены и искусственно в лаборатории.

Координатное время жизни покоящегося мюона в среднем равно $2.2 \cdot 10^{-6}$ сек. (это время, естественно, фиксируется по «земным» часам, установленным в лаборатории). Представим, что в лаборатории получены два мюона: один - покоящийся, другой - движущийся со скоростью, близкой к скорости света. Одинаковую ли продолжительность жизни зафиксируют лабораторные часы у этих двух мюонов? Нет, не одинаковую, утверждает теория относительности. Движущийся мюон проживет гораздо дольше, и это действительно так. В этом убеждает нас сама природа. Экспериментально обнаружено, что некоторые из быстрых мюонов, образующихся в верхних слоях атмосферы, достигают поверхности Земли, пролетая за время своей жизни расстояние почти в два десятка километров. Как это им удается? Ведь если бы координатное время жизни быстрого космического мюона было таким же, как и медленного или покоящегося, т.е. порядка $2.2 \cdot 10^{-6}$ сек., то, даже двигаясь со скоростью света, мюон не смог бы преодолеть расстояние, превышающее 660 м., ($c\Delta t_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с} \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 660 \text{ м}$)

и, следовательно, никогда не достиг бы поверхности Земли. То, что мюоны достигают поверхности Земли, доказывает, что в земной системе отсчета их время жизни значительно больше, чем $2.2 \cdot 10^{-6}$ сек (при $\vartheta = 0.9995c$ оно составляет $7.3 \cdot 10^{-5}$ сек.), поэтому за отведённые им доли земной секунды мюоны успевают преодолеть расстояние почти в 20 км. Заметим, что для наблюдателя, движущегося вместе с мюоном, это расстояние будет порядка 600 м (оно оказывается много меньше 20 км вследствие лоренцева сокращения).

7 ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ПОНЯТИЯ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

1. Пусть в системе $0'$ в двух разных точках, «иксовые» координаты которых x'_1 и x'_2 , в момент времени t' одновременно происходят два физических события, не связанные друг с другом причинно-следственными отношениями. Событие, происходящее в точке x'_1 , назовем событием 1, событие в точке x'_2 - событием 2. Одновременны ли эти события для наблюдателя, находящегося в системе 0 ? В системе 0 этим событиям соответствуют моменты времени

$$t_1 = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{и} \quad t_2 = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Из этих формул видно, что $t_1 \neq t_2$ (так как $x'_1 \neq x'_2$). В системе O события происходят не одновременно, а по прошествии промежутка времени Δt :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{v(x'_2 - x'_1)}{c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (7.1)$$

В зависимости от знака разности $(x'_2 - x'_1)$ промежуток времени Δt может быть как положительным, так и отрицательным. Следовательно, событие 1 происходящее в системе O' одновременно с событием 2, в системе O может, как опережать, так и отставать от события 2.

Таким образом, и понятие одновременности – относительно. С точки зрения классической физики одновременность – абсолютна: события одновременные в одной инерциальной системе, одновременны во всех других инерциальных системах.

2. Несколько слов о взглядах классической механики и теории относительности на причинно-следственные отношения между физическими событиями.

Причинная связь между двумя событиями, происходящими в отдаленных точках пространства, состоит в следующем. Событие, происходящее в одной точке (например, выстрел из пушки) вызывает отправление некоторого сигнала (в общем случае сигналом следует считать все то, посредством чего одно тело оказывает воздействие на другое, снаряда в нашем случае), который, прибыв в другую точку, вызывает в ней второе событие (взрыв, образование воронки). Связь между причиной (выстрел) и следствием (взрыв) состоит в движении сигнала, связывающего события.

Классическая механика считала, что два события, выступающие друг по отношению к другу как причина и следствие, могут быть одновременными не только тогда, когда они происходят в одной и той же точки пространства, но и тогда, когда они происходят в отдаленных точках. Это утверждение основывается на представлении о мгновенной передачи сигналов. Действительно, если сигнал распространяется с бесконечной скоростью, то два события, связанные таким сигналом,

будут одновременными во всех системах отсчета. Это правило следует из (7.1). Если бы c (скорость сигнала) была равна бесконечности, то

$$\Delta t = \frac{\vartheta(x'_2 - x'_1)}{c^2 \sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} = 0.$$

В этом случае можно было бы говорить о чисто пространственных причинных связях, рассматривать пространство вне времени, независимо от времени.

Но как установила теория относительности, взаимодействия распространяются с конечной скоростью. Поэтому два события, происходящие в разных точках пространства, могут быть связаны причинной связью только в том случае, если время между этими событиями не меньше времени, необходимого свету для того, чтобы пройти расстояние между точками, где произошли события. Такие события будут *неодновременными* в любой системе отсчёта, в любой системе отсчёта причина будет предшествовать следствию.

События, связанные причинно – следственными отношениями, могут быть одновременными только в том случае, если они происходят в одной и той же точке пространства. Действительно, если события в системе $0'$ происходят одновременно и в одной и той же точке ($x'_1 = x'_2$), то они будут одновременными и в системе 0 , и во всех других инерциальных системах, словом, оба события будут совершаться абсолютно одновременно.

8 ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КИНЕМАТИКЕ

1. В теории относительности классический закон сложения скоростей Галилея заменяется релятивистским законом Эйнштейна.

Пусть некоторое тело движется вдоль оси x . Обозначим скорость этого тела относительно системы 0 через \vec{u} , относительно системы $0'$ - через \vec{u}' . Так как скорости \vec{u} и \vec{u}' направлены вдоль осей x и x' , то $u'_x = u'$, а $u_x = u$, (проекции \vec{u}' и \vec{u} на другие оси равны нулю). Свяжем u'_x и u_x или, что то же самое в нашем случае, u' и u .

$$u' = u'_x = \frac{dx'}{dt'}; \quad u = u_x = \frac{dx}{dt}. \quad (8.1)$$

Найдем дифференциалы dx' и dt' . По (5.4*) и (5.7*)

$$x' = \frac{x - \vartheta t}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}; \quad t' = \frac{t - \frac{\vartheta x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}.$$

dx' и dt' равны соответственно:

$$dx' = \frac{dx - \vartheta dt}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} \quad \text{и} \quad dt' = \frac{dt - \frac{\vartheta}{c^2} dx}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}.$$

Значит, $u' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - \vartheta dt}{dt - \frac{\vartheta}{c^2} dx}$. Разделив числитель и знаменатель пра-

вой части этого равенства на dt , получим:

$$u' = \frac{\frac{dx}{dt} - \vartheta}{1 - \frac{\vartheta}{c^2} \frac{dx}{dt}}.$$

Но $\frac{dx}{dt}$ есть u . Учитывая это, получим окончательно:

для перехода $0 \rightarrow 0'$: для перехода $0' \rightarrow 0$:

$$u' = \frac{u - \vartheta}{1 - \frac{\vartheta}{c^2} u}; \quad u = \frac{u' + \vartheta}{1 + \frac{\vartheta}{c^2} u'}. \quad (8.2)$$

2. Из (8.2) следует, что если скорость тела относительно некоторой системы отсчета не превышает скорость света в вакууме, то она не может превысить скорость света и в любой другой системе, движущейся по отношению к исходной со скоростью, меньшей c (по теории относительности ни одно материальное тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме). Пусть скорость тела, движущегося вдоль оси x , относительно системы $0'$ равна $\frac{4}{5}c$ ($u' = \frac{4}{5}c$), а скорость самой системы $0' - \frac{3}{4}c$ ($\vartheta = \frac{3}{4}c$). Найдем скорость тела относительно системы 0 . По классическому правилу сложения скоростей скорость тела в системе 0 должна быть равна

$$u = u' + \vartheta = \frac{4}{5}c + \frac{3}{4}c = \frac{31}{20}c,$$

т.е. больше c ; по релятивистскому правилу:

$$u = \frac{u' + \vartheta}{1 + \frac{\vartheta}{c^2}u'} = \frac{\frac{4}{5}c + \frac{3}{4}c}{1 + \frac{\frac{3}{4}c}{c^2} \cdot \frac{4}{5}c} = \frac{31}{32}c,$$

т.е. меньше c .

Рассмотрим предельный случай. Пусть наблюдатель в системе $0'$ видит, как распространяется свет: $u' = c$. Какой будет скорость света в системе 0 ? Подставив $u' = c$ в формулу (8.2), получим

$$u = \frac{c + \vartheta}{1 + \frac{\vartheta}{c^2}c} = c.$$

Так оно и должно быть, ибо предположение о постоянстве скорости света во всех инерциальных системах отсчета положено в самую основу преобразований Лоренца и, следовательно, релятивистского закона сложения скоростей.

3. Классическая механика широко пользуется понятием абсолютного твёрдого тела. Теория относительности отвергает существование таких тел даже как некоторой идеализации. Действительно, если бы расстояния между частицами некоторого тела были неизменными, то смещение любой из частиц, например A (рис. 4), вызвало бы *одновременное* смещение всех других частиц.

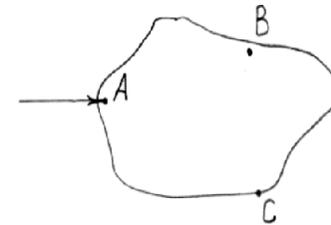


Рис.4

Но это означало бы, что силовое взаимодействие между частицами передаётся мгновенно, с бесконечно большой скоростью. По теории относительности это невозможно. Поскольку воздействие частиц друг на друга передаётся с конечной скоростью, частицы приходят в движе-

ние не одновременно, а с некоторым запозданием. А это означает, что расстояния между частицами изменяются - тело деформируется. Следовательно, его нельзя назвать абсолютно твёрдым.

9 ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ

1. Первый закон Ньютона инвариантен относительно преобразований Лоренца. (Если физические величины или законы инвариантны относительно преобразований Лоренца, будем называть их *релятивистски – инвариантными*.) Действительно, если тело движется без ускорения в системе $0'$ (скорость $\vec{u} = \text{const}$), то его скорость останется неизменной и в системе 0 (это видно из формулы (8.2)).

2. Второй закон Ньютона не инвариантен относительно преобразований Лоренца, если массу полагать величиной неизменной.

3. А. Эйнштейн показал, что масса является функцией не только внутренних свойств тела, но и состояния движения. Она зависит от скорости тела относительно выбранной системы отсчёта по закону:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (9.1)$$

где m_0 - масса тела, измеренная в системе, по отношению к которой тело покоится (масса покоя); m - масса движущегося тела (релятивистская масса); v - скорость тела относительно системы отсчёта. Вели-

чину $\Delta m = m - m_0 = m_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$ принято называть массой движе-

ния или движущейся массой. Как видно из формулы (9.1) при $v \rightarrow c$, $m \rightarrow \infty$. Это значит, что при $v \rightarrow c$ инертность тела беспредельно возрастает. Чтобы сообщить такому телу отличное от нуля ускорение, к нему необходимо приложить бесконечно большую силу. Между тем любое реальное воздействие конечно. Следовательно, ни одному телу, обладающему массой покоя, не может быть сообщена скорость, равная скорости света. Со скоростью c могут двигаться лишь частицы, не обладающие массой покоя, частицы, которым «запрещено» покоиться в любых системах отсчёта. Такие частицы существуют. Это световые кванты - фотоны и нейтрино.

4. Второй закон Ньютона оказывается релятивистски-инвариантным, если под m понимать величину, определяемую соотношением (9.1). Правильным, релятивистски-инвариантным выражением второго закона Ньютона будет следующее:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \vec{v} \right) = \vec{F}$$

или

$$\frac{d}{dt} (m\vec{v}) = \vec{F}, \quad (9.2)$$

где m - релятивистская масса тела. При $v \ll c$ $m = m_0$ и выражение второго закона Ньютона принимает привычный для нас вид:

$$\frac{d}{dt} (m_0 \vec{v}) = \vec{F}.$$

5. Релятивистский импульс, в отличие от классического, не является линейной функцией скорости:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (9.3)$$

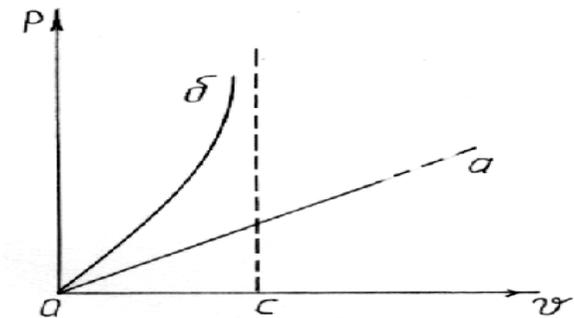


Рис.5

На рисунке 5 изображены графики зависимости импульса тела от скорости по классическим представлениям (график а) и представлениям теории относительности (график б).

При $v \ll c$ формула 9.3 переходит в классическое выражение для импульса $\vec{p} = m_0 \vec{v}$.

10 ЗАКОН ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ МАССЫ И ЭНЕРГИИ

Эйнштейном открыт важнейший для современной физики закон пропорциональности массы и энергии.

1. Пусть на первоначально покоящееся тело массой m_0 в течение некоторого времени действовала сила \vec{F} . Для простоты будем полагать, что направление силы во время движения тела не изменилось. Это означает, что направления силы, перемещения и скорости в любой момент времени будут совпадать. Под действием приложенной силы тело будет двигаться со все возрастающей скоростью. Кинетическая энергия тела будет увеличиваться, её приращение будет равно работе силы, действующей на тело:

$$dE_k = dA. \quad (10.1)$$

По определению элементарная работа равна $dA = Fdr \cos 0 = Fdr$.

Значит, $dE_k = Fdr$.

По второму закону Ньютона

$$F = \frac{d}{dt}(m\vartheta),$$

где m - релятивистская масса (зависит от ϑ , и значит от t). Продифференцируем $(m\vartheta)$ по времени:

$$F = \vartheta \frac{dm}{dt} + m \frac{d\vartheta}{dt}.$$

Таким образом,

$$dE_k = Fdr = \vartheta dm \frac{dr}{dt} + m d\vartheta \frac{dr}{dt} = \vartheta^2 dm + m \vartheta d\vartheta,$$

так как $\frac{dr}{dt}$ есть ϑ .

В соответствии с (9.1)

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} = m_0 \left(1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Найдем приращение массы, соответствующее увеличению скорости на $d\vartheta$ (дифференциал от m).

$$dm = m'd\vartheta = \left(-\frac{m_0}{2}\right) \left(1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}\right)^{-\frac{3}{2}} \left(-\frac{2\vartheta}{c^2}\right) d\vartheta = \frac{m_0 \vartheta d\vartheta}{c^2 \left(1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{m \vartheta d\vartheta}{c^2 - \vartheta^2}.$$

Учитывая выражение для dm , найдём, что

$$dE_\kappa = \vartheta^2 \frac{m \vartheta d\vartheta}{c^2 - \vartheta^2} + m \vartheta d\vartheta = m \vartheta d\vartheta \left(\frac{\vartheta^2 + c^2 - \vartheta^2}{c^2 - \vartheta^2}\right) = c^2 dm. \quad (10.2)$$

Проинтегрируем (10.2). Изменению скорости тела от 0 до ϑ соответствуют изменения: кинетической энергии – от 0 до E_κ , массы – от m_0 до m . Следовательно,

$$\int_0^{E_\kappa} dE_\kappa = c^2 \int_{m_0}^m dm.$$

Проинтегрировав, получим релятивистское выражение для кинетической энергии тела

$$E_\kappa = mc^2 - m_0c^2 \quad \text{или} \quad E_\kappa = \Delta mc^2, \quad (10.3)$$

где $\Delta m = m - m_0$.

2. Нетрудно показать, что это выражение отлично от классического выражения для кинетической энергии $\frac{m\vartheta^2}{2}$.

$$E_\kappa = mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} - m_0c^2 = m_0c^2 \left[\left(1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right].$$

Разлагая $\left(1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ в ряд по формуле бинома Ньютона, получим:

$$E_\kappa = m_0c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\vartheta^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{\vartheta^4}{c^4} + \dots - 1\right) = \frac{m_0\vartheta^2}{2} + \frac{3\vartheta^4}{8c^4} + \dots \quad (10.4)$$

Таким образом, релятивистское выражение для кинетической энергии отличается от классического тем, что содержит дополнительные слагаемые - $\frac{3}{8} \frac{v^4}{c^2}$ и т. д.

На рисунке 6 приведены графики зависимости кинетической энергии от скорости в классической (график *a*) и релятивистской механики (график *б*).

Если $v \ll c$, вторым и всеми последующими членами ряда (10.4) можно пренебречь и тогда $E_k = \frac{m_0 v^2}{2}$.

3. Как видно из выражения (10.3), кинетическая энергия тела равна разности величин mc^2 и m_0c^2 , которые по своему смыслу могут

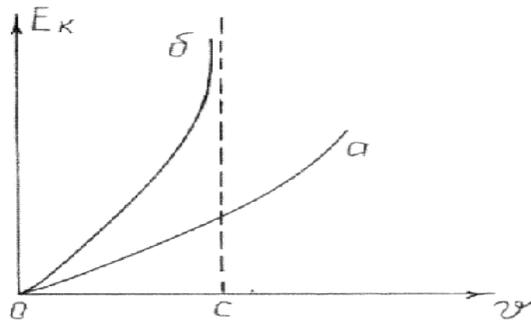


Рис.6

быть только энергией. Величину

$$E_0 = m_0c^2 \quad (10.5)$$

Эйнштейн назвал энергией покоя, а величину

$$E = mc^2 \quad (10.6)$$

полной энергией тела.

(Формально $E_0 = m_0c^2 + const$ и $E = mc^2 + const$.

Но $const \equiv 0$, в противном случае эти соотношения противоречили бы основному тезису диалектического материализма о том, что движение без материи невозможно. Выражение $m = 0$ означает отсутствие какого - бы то ни было материального объекта и, следовательно, отсутствие движения, энергии. Если $m = 0$, то и $E = 0$. Отсюда следует, что $const = 0$.)

Из (10.3) видно также, что сообщение телу кинетической энергии E_k сопровождается увеличением его массы на

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

4. В рассматриваемом нами случае изменение массы тела было обусловлено передачей ему кинетической энергии макроскопического движения. Согласно теории относительности *любое изменение полной энергии тела сопровождается изменением его массы:*

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

И наоборот, всякое изменение массы сопровождается изменением энергии:

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

Какой бы ни была форма энергии, с ней всегда связана масса $m = \frac{E}{c^2}$.

Какой бы ни была масса, с ней всегда связана энергия $E = mc^2$.

Соотношение $E = mc^2$ выражает один из самых фундаментальных законов природы – закон взаимосвязи, пропорциональности энергии и массы: *полная энергия тела равна произведению его релятивистской массы на квадрат скорости света в вакууме.*

Полная энергия включает в себя кинетическую энергию тела как целого, а также энергию всех форм движения и взаимодействия молекул, атомов, элементарных частиц, из которых построено тело.

З а м е ч а н и е. В полную энергию и энергию покоя не входит потенциальная энергия, которой обладает тело во внешнем потенциальном поле.

5. Теория относительности открыла новую грань физического содержания массы. В релятивистской механике масса служит не только мерой инерционных и гравитационных свойств материальных объектов (вещества и поля), но является мерой полной энергии, которой обладает тот или иной объект в рассматриваемой системе отсчёта.

6. Предостерегаем от неправильного, идеалистического толкования соотношения $E = mc^2$. Нельзя думать, что масса превращается в энергию (подтекст в его наихудшем варианте: в движение) или наоборот. Это соотношение означает, что любой материальный объект обладает массой, и энергией, причем масса и энергия пропорциональны друг другу: чем больше масса, тем больше энергия и наоборот. Масса и энергия характеризуют разные свойства материи, поэтому ни о каком их взаимном превращении не может быть и речи.

11 ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МАССЫ И ЭНЕРГИИ В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ МЕХАНИКЕ

1. В классической физике существуют независимо друг от друга законы сохранения – закон *сохранения массы* и закон *сохранения энергии*.

2. Так как в теории относительности полная энергия неразрывно связана с массой, то в релятивистской механике имеет место лишь один закон сохранения, который можно называть и законом сохранения энергии, и законом сохранения массы. Если на тело внешние силы не действуют, его релятивистская масса и, следовательно, полная энергия сохраняются.

$$m = \frac{E}{c^2} = \text{const}_1 \quad (11.1) \quad \text{или} \quad E = mc^2 = \text{const}_2 \quad (11.2)$$

В случае изолированной системы невзаимодействующих частиц

$$m = \sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_{0i}}{\sqrt{1 - \frac{v_i^2}{c^2}}} = \text{const}_1 \quad (11.3)$$

или

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_{0i}c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_i^2}{c^2}}} = \text{const}_2, \quad (11.4)$$

где m_i - релятивистская масса i -й частицы; E_i - полная энергия i -ой частицы.

В случае системы взаимодействующих частиц необходимо дополнительно учесть энергию взаимодействия частиц (так называемую энергию связи). Если система взаимодействующих частиц является изолированной, то её энергия (энергия покоя всех частиц плюс их кинетическая энергия, плюс энергия связи) сохраняется:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i + E_{св} = \text{const}_3, \quad (11.5)$$

$E_{св}$ - энергия связи всех частиц системы. Разделив (11.5) на c^2 , получим

$$m = \sum_{i=1}^n m_i + \frac{E_{ce}}{c^2} = const_4, \quad (11.6)$$

где m - масса всей системы; $\sum_{i=1}^n m_i$ - сумма релятивистских масс отдельных её частиц;

$\frac{E_{ce}}{c^2} = \Delta m$ - масса, соответствующая энергии связи

(в атомной физике эта величина получила название *дефекта массы*)

Таким образом, *полная масса замкнутой системы есть величина постоянная*. Из (11.6) отчетливо видно, что масса не является величиной *аддитивной*: масса системы не равна сумме масс составляющих её частей. Так, например, масса покоя ядра любого атома всегда меньше суммы масс покоя частиц, входящих в её состав. Чтобы расчлнить ядро на соответствующие его частицы, требуется затратить энергию, равную энергии связи.

3. Закон сохранения энергии в релятивистской форме стал одним из основных положений современной ядерной физики повседневно находит экспериментальное подтверждение. В частности, экспериментально доказано, что энергия покоя может полностью переходить в энергию движения, т.е. частицы с ненулевой массой покоя, обладающие сравнительно небольшой энергией движения могут превращаться в частицы с нулевой массой покоя и с очень большой энергией движения (так называемая аннигиляция частиц – превращение частиц в кванты электромагнитного излучения). И наоборот, соответственно (рождение частиц из γ - квантов).

12 ЧЕТЫРЕХМЕРНОЕ ПРОСТРАНСТВО. ИНВАРИАНТНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО – ВРЕМЕННОГО ИНТЕРВАЛА

1. Немецкий математик Г. Минковский в 1908 г. дал геометрическую интерпретацию теории относительности. Минковский исходил из идеи абстрактного четырехмерного «пространства», в котором каждой точке соответствует четыре координаты: три пространственные и одна – временная.

2. С пространственно – временным представлением движения мы, в сущности, знакомы на примере графиков движения. Так, если материальная точка движется вдоль оси x (рис. 7,а), то графиком её движения будет некоторая кривая (рис. 7,б). Все множество точек плоскости t, x образует двумерное «пространство» движений вдоль оси x . Ка-

ждой точке такого «пространства» соответствует две координаты: одна пространственная (в обычном смысле), другая – временная. Как видим, движение в двумерном «пространстве» изображается двумерной пространственно - временной кривой.

3. Представим теперь, что точка движется равномерно по окружности в плоскости x, y (рис. 8, а).

Пространственно – временная кривая такого движения будет представлять собой цилиндрическую спираль (рис.8.б). Множество соответствующих значений x, y, t образуют трёхмерное «пространство» плоского движения. Каждой точке такого «пространства» соответствует три координаты: две – пространственные, одна – временная.

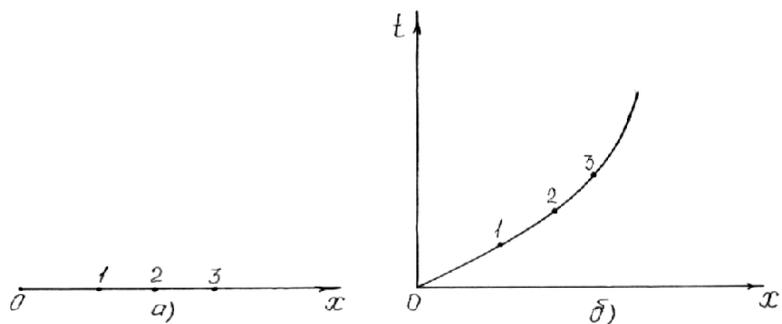


Рис.7

4. Вообразим, наконец, что точка движется по произвольной пространственной траектории (рис.9).

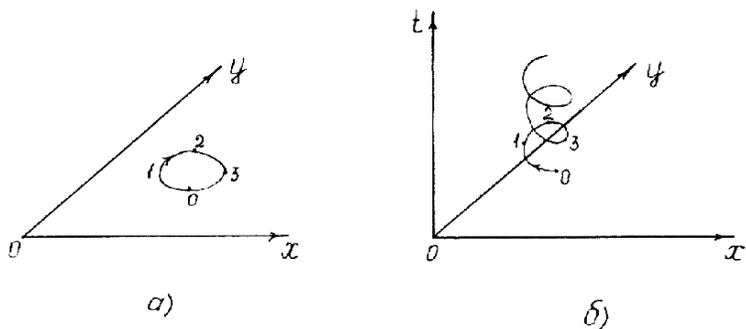


Рис.8

К сожалению, пространственно – временной график такого движения нельзя ни построить на бумаге, ни даже сконструировать в виде пространственной модели (так как четвёртую, временную ось провести

или построить так, чтобы она одновременно была перпендикулярна ко всем трём осям x, y, z невозможно). Невозможность представить наглядно четырёхмерную кривую не должна, однако, особенно смущать. В физике немало других величин и понятий, которые также нельзя представить в виде наглядных образов.

Но это не делает их менее объективными. Все подобные величины отражают действительные свойства реальных объектов, они входят в соответствующие формулы и уравнения, их можно вычислить.

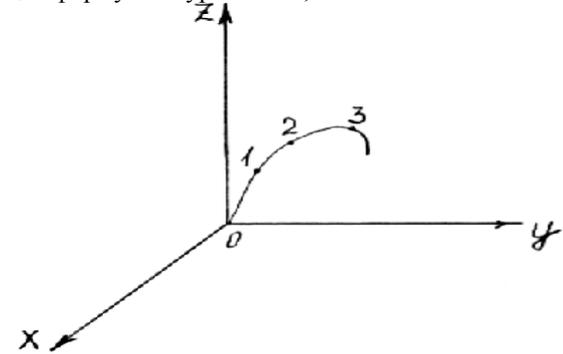


Рис.9

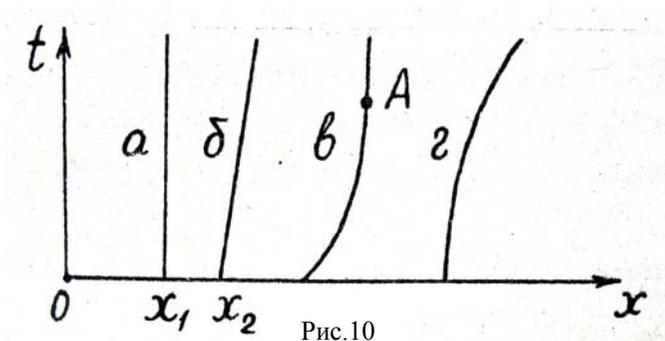
5. Введя в соответствующие формулы наряду с тремя пространственными координатами четвертую – время, отказавшись от наглядности, Минковский предложил движение в пространственно-временном аспекте, в четырёхмерном пространстве – времени. Подчеркнем: четырёхмерное представление реальных движений – не искусственный прием, а лишь геометрическое выражение одной идеи теории относительности о взаимосвязи пространства и времени.

Точка, которой соответствуют четыре координаты, три – пространственные (в обычном смысле) и одна – временная, называется *мировой точкой*. Каждой мировой точке отвечает событие – *пребывание* частицы в определенной пространственной точке в определенный момент времени. Многообразие мировых точек образует четырёхмерный пространственно-временной «мир» или пространство Минковского. Всякой частице в пространстве Минковского соответствует линия, называемая *мировой линией*. Мировая линия покоящейся частицы представляет собой прямую, параллельную оси времени (пространственные координаты такой частицы не изменяются, изменяется только временная координата).

Мировая линия произвольно движущейся частицы наклонена под определенным углом ко всем четырём осям. В простейшем случае, ко-

гда частицы движется вдоль какой-либо из осей, например X , мировую линию можно изобразить и на чертеже. На рис.10 изображены мировые линии четырех частиц:

- а) частица покоится в точке x_1 ;
- б) частица вышла из точки x_2 и движется вдоль оси X с постоянной скоростью;
- в) частицы движется замедленно, точка A соответствует остановке;
- г) частица движется ускоренно.



6. Инвариантом галилеевых преобразований является расстояние между точками обычного трёхмерного пространства, т.е. величина

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}, \quad (12.1)$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - координатные разности.

Можно показать, что инвариантом лоренцевых преобразований является не обычное расстояние Δr , а отрезок мировой линии, т.е. «расстояние» между точками четырёхмерного пространства – времени – так называемый *пространственно-временной интервал*. Если координаты одного события x_1, y_1, z_1, t_1 , другого - x_2, y_2, z_2, t_2 , то интервалом между этими событиями называется величина, определяемая соотношением

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2}, \quad (12.2)$$

где $\Delta x = x_2 - x_1$; $\Delta y = y_2 - y_1$; $\Delta z = z_2 - z_1$; $\Delta t = t_2 - t_1$, а c - скорость света в вакууме. Как видно, интервал связывает положение и время одного события с положением и временем другого события, т.е. харак-

теризует «удаленность» событий не просто в пространстве и не только во времени, а в пространстве-времени.

Пространственно-временной интервал – один из важнейших инвариантов теории относительности.

7. В заключение приведём список относительных и абсолютных величин и соотношений в релятивистской механике.

Относительные (неинвариантные) величины и соотношения	Абсолютные (инвариантные) величины и соотношения
Координаты (пространственное положение тел)	Максимальная скорость распространения взаимодействий (скорость света в вакууме)
Траектория движения	Скорость частиц, не обладающих массой покоя
Скорость тел, обладающих массой покоя	Масса покоя отдельной частицы (при условии, если частица не аннигилирует)
Энергия	Собственная длина тела
Импульс	Собственное время
Момент импульса	Пространственно-временной интервал
Релятивистская масса	
Ход времени и промежутки времени	
Одновременность событий	
Расстояние между точками	
Геометрическая форма тел (конфигурация системы)	

Таковы некоторые выводы специальной теории относительности. Непреходящее значение теории относительности состоит в том, что она разрушила учение классической физики об абсолютном характере пространства и времени, установила их относительный характер, открыла непрерывную связь между пространством и временем. *Пространство и время образуют единую форму существования материи.*

Оценивая значение теории относительности, не следует, однако, впадать в философский релятивизм («всё в мире относительно»). Теория относительности отнюдь не отрицает существование абсолютных величин и понятий. Она устанавливает лишь, что ряд понятий и величин,

считавшихся в классической физике абсолютными, в действительности являются относительными.

И ещё. Не следует думать, что с появлением теории относительности классическая физика полностью утратила своё значение. Релятивистские эффекты для обычных макроскопических тел и обычных скоростей движения – столь тонкие эффекты, что оказываются далеко за пределами практической точности. Поэтому в большинстве отраслей техники классическая физика «работает» столь же хорошо, как и прежде.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. На сколько процентов изменится продольный размер протона и электрона после прохождения ими разности потенциалов $U = 10^6 \text{ В}$?

Решение. В соответствии с релятивистской формулой продольный размер частицы $l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$, где $\beta = v/c$. Относительное изменение продольных размеров $\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} = 1 - \sqrt{1 - \beta^2}$.

В обоих случаях кинетическая энергия частиц равна $qU = 1 \text{ МэВ}$. Из релятивистской формулы найдём значение кинетической энергии

$$T = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) = qU.$$

Откуда $\sqrt{1 - \beta^2} = \frac{m_0c^2}{qU + m_0c^2}$. С учётом этого замечания получим

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} = 1 - \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{qU}{qU + m_0c^2}.$$

Из таблиц имеем для электрона $m_0c^2 = 0,512 \text{ МэВ}$, для протона $m_0c^2 = 939 \text{ МэВ}$. Подставив числовые значения в расчётную формулу, получим:

$$\left(\frac{\Delta l}{l_0} \right)_e = \frac{1}{1 + 0,512} = 0,661 = 66,1\%, \quad \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right)_p = \frac{1}{1 + 939} \approx 0,001 = 0,1\%.$$

Пример 2. При каких значениях $\beta = v/c$ собственное время частиц отличается на $k = 10^{-3}, 10^{-2}, 5 \cdot 10^{-1}$ от времени по неподвижным часам?

Решение. Если собственное время частицы обозначить τ'_0 , а тот же промежуток времени по неподвижным часам τ , то это время будет

$$\tau = \frac{\tau'_0}{\sqrt{1-\beta^2}}. \text{ Относительное изменение времени}$$

$$k = \frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\tau - \tau'_0}{\tau} = 1 - \sqrt{1-\beta^2}. \text{ Откуда получим } 1 - \beta^2 = (1 - k^2) \text{ или}$$

$$\beta^2 = 2k - k^2. \text{ Окончательно } \beta = \sqrt{2k - k^2}.$$

Для первых двух случаев можно принять $\beta = \sqrt{2k}$. Тогда $\beta_1 = 0,0447$; $\beta_2 = 0,141$; $\beta_3 = 0,866$.

Пример 3. Какую разность потенциалов должны пройти электрон и протон, чтобы их собственное время стало в $k = 10$ раз меньше лабораторного?

Решение. Обозначим собственное время частицы как τ'_0 , тогда лабораторное время $\tau = \frac{\tau'_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$. Так как $k = \frac{\tau}{\tau'_0}$, то $\tau = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$.

При прохождении разности потенциалов U частица приобретает кинетическую энергию qU . По релятивистской формуле эта энергия

$$\text{равна } m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) = m_0 c^2 (k - 1), \quad \text{откуда } U = \frac{m_0 c^2}{q} (k - 1).$$

Подставив в эту формулу табличные данные и произведя вычисления, получим для электрона $U = 4,61 \text{ MB}$, для протона $U = 8450 \text{ MB}$.

Пример 4. Протон и α -частица проходят одинаковую ускоряющую разность потенциалов U , после чего масса протона составила треть массы α -частицы. Определить разность потенциалов.

Решение. Полная энергия частицы пропорциональна её массе $E = mc^2$. Поэтому можно записать $E_p = E_\alpha / 3$. Полная энергия складывается из энергии покоя частицы m_0c^2 и кинетической энергии qU .

Учитывая, что заряд протона равен e , а α – частицы – $2e$, запишем соотношение для полных энергий в виде

$$m_{0p}c^2 + eU = (m_{0\alpha}c^2 + 2eU)/3.$$

Приведя подобные члены получаем $\frac{eU}{3} = \left(\frac{m_{0\alpha}}{3} - m_{0p}\right)c^2$, откуда

$$U = \frac{(m_{0\alpha} - 3m_{0p})c^2}{e}, \quad U = 912 \text{ МВ}.$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чём физическая сущность механического принципа относительности?
2. В чём заключается правило сложения скоростей в классической механике?
3. Каковы причины возникновения специальной теории относительности (СТО)?
4. В чём заключаются основные постулаты СТО?
5. Зависит ли от скорости движения системы отсчёта скорость тела? Скорость света?
6. Запишите и прокомментируйте преобразования Лоренца. При каких условиях они переходят в преобразования Галилея?
7. Какой вывод о пространстве и времени можно сделать на основе преобразований Лоренца?
8. Одновременны ли события в штрихованной системе, если в нештрихованной системе они происходят в одной точке и одновременны? В нештрихованной системе события разобщены, но одновременны? Ответ обоснуйте.
9. Какие следствия вытекают из СТО для размеров тел и длительности событий в разных системах отсчёта? Ответ обосновать.
10. В чём заключается релятивистский закон сложения скоростей? Как показать, что он находится в согласии с постулатами Эйнштейна?
11. Как определяется интервал между событиями? Доказать, что он является инвариантным при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой.
12. Какой вид имеет основной закон релятивистской динамики? Чем он отличается от основного закона ньютоновской механики?

13. В чём заключается закон сохранения релятивистского импульса?

14. Как выражается кинетическая энергия в релятивистской механике? При каком условии релятивистская формула для кинетической энергии переходит в классическую формулу?

15. Сформулируйте и запишите закон взаимосвязи массы и энергии. В чём его физическая сущность? Приведите примеры его экспериментального подтверждения.

16. Какие Вам известны величины, сохраняющиеся при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

Савельев И. В. Курс общей физики: в 3 т.; учебное пособие для вузов. т.1: Механика. Молекулярная физика. /И.В. Савельев.-4-е изд. стер.-СПб.: Лань, 2005.

Зисман Г. А. Курс общей физики. Т.1 /Г.А. Зисман, О.М.Тодес.– М.:Наука,1972.

Детлаф А. А. Курс физики: учебное пособие для вузов. /А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.-4-е изд., испр.- М.: Высш.шк.,2002.- 718 с.

Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов. /Т.И.Трофимова.- 7-е изд., стер.- М.: Высш. шк., 2001.- 541 с.

Чертов А.Г. Задачник по физике: учебное пособие для вузов./А.Г.Чертов, А.А.Воробьев.- 8-е изд., перераб. и доп.- М.: Физматлит, 2006.- 640 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	
1 Представления классической механики о пространстве, времени и движении	3
2 Принцип относительности в классической физике. преобразования Галилея	6
3 Экспериментальные основы специальной теории относительности.....	9
4 Основные положения специальной теории относительности (постулаты Эйнштейна).....	12
5 Преобразования Лоренца.....	13
6 Следствия из преобразований Лоренца.....	15
7 Относительность понятия одновременности.....	21
8 Закон сложения скоростей в релятивистской кинематике.....	23
9 Элементы релятивистской динамики.....	26
10 Закон пропорциональности массы и энергии.....	28
11 Закон сохранения массы и энергии в релятивистской механике.....	31
12 Четырехмерное пространство. Инвариантность пространственно-временного интервала.....	33
Примеры решения задач.....	38
Вопросы для самопроверки.....	40
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	41

Учебное издание

Автор - составитель
БАРСУКОВ Владимир Иванович

ФИЗИКА

ЭЛЕМЕНТЫ
СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Конспект лекций

Инженер по компьютерному макетированию
Е.Н. Аверина

Подписано к печати 4.09.2010
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Объем 2,5 усл. печ. л., 2,0 уч. изд.
Тираж 50. Заказ № 917

Отпечатано с готового оригинал-макета
ЗАО ПК «Спектр»

В.И.БАРСУКОВ

ФИЗИКА

**ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ
ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

ТАМБОВ 2010