

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра физики и методики преподавания физики

ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Методические указания

Составители: И.Н. Анисина, Т.И. Пискарёва

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящих в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки»

Оренбург
2020

УДК 530.1(076.5)
ББК 22.31я7
Э 46

Рецензент – кандидат физико-математических наук, доцент Н.А. Манаков

Э 46 **Элементы специальной теории относительности:** методические указания / составители: И.Н. Анисина, Т.И. Пискарёва; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2020. – 36 с.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы по изучению темы «Элементы специальной теории относительности» курса физики. Работа включает теоретическое изложение материала, тест для самопроверки, примеры решения задач, а также задачи для самостоятельного решения и контрольные вопросы для самоподготовки.

Методические указания предназначены для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки».

УДК 530.1(076.5)
ББК 22.31я7

© Анисина И.Н.,
Пискарёва Т.И.,
составление, 2020
© ОГУ, 2020

Содержание

1. Геометрические и физические преобразования координат. Инерциальные системы отсчета и принцип относительности. Инварианты преобразований. Теорема сложения скоростей в классической механике.....	4
2. Классический принцип относительности и скорость света.....	9
3. Постулаты специальной теории относительности.....	11
4. Понятие пространства и времени.....	11
5. Преобразования Лоренца.....	15
6. Следствия из преобразований Лоренца.....	16
6.1 Одновременность событий в разных системах отсчета.....	16
6.2 Длина тел в разных системах отсчета.....	17
7. Теорема сложения скоростей в специальной теории относительности.....	18
8. Опытные подтверждения принципа постоянства скорости света.....	19
9. Элементы релятивистской динамики.....	24
9.1 Энергия. Закон пропорциональности.....	25
9.2 Философское значение закона пропорциональности.....	26
10. Тест для самопроверки.....	27
11. Примеры решения задач.....	31
12. Задачи для самостоятельного решения.....	33
13. Контрольные вопросы.....	34
Список использованных источников.....	35

1 Геометрические и физические преобразования координат. Инерциальные системы отсчета и принцип относительности. Инварианты преобразований. Теорема сложения скоростей в классической механике

Положение материальной точки относительно материального тела, принятого за систему отсчета, описывается с помощью системы координат, а в каждой системе координат положение точки задается тремя числами, называемыми координатами.

Формулы, связывающие эти числа в одной системе координат, с соответствующими числами в другой системе координат, называются формулами преобразования координат или просто преобразованием координат. Например, преобразование сферической системы координат к декартовой и др.

Эти преобразования координат происходят в одной и той же системе отсчета и являются чисто геометрическими операциями, осуществляемыми алгебраическими методами. Они не связаны с движением тела отсчета.

Если имеются различные системы координат с различными телами отсчета, которые покоятся друг относительно друга, то эти системы координат описывают одну и ту же систему отсчета в различных переменных. Ибо покоящиеся друг относительно друга системы отсчета в совокупности составляют одну систему отсчета. Эти преобразования являются чисто геометрическими.

Если различные материальные тела, с которыми связаны различные системы отсчета, находятся в движении друг относительно друга, то возникает вопрос о том, как связаны координаты и время двух разных систем отсчета? Ответ на этот вопрос не может быть дан лишь на основе геометрических соображений. Это физическая задача. Она превращается в геометрическую лишь в том случае, когда относительная скорость различных систем равна нулю.

Рассмотрим две системы отсчета.

Одну систему отсчета будем условно называть неподвижной (связанной с Землей) K , а другую K' – совершающей поступательное равномерное прямолинейное движение со скоростью \vec{v} , относительно первой. В каждой из систем отсчёта введем декартову систему координат. Координаты в системе отсчета K (x, y, z). Координаты в системе отсчета – K' (x', y', z'). Например, на палубе корабля, равномерно и прямолинейно движущегося вдоль берега, перемещается тело. Рассмотрим его движение относительно системы K и K' . В любой момент времени координаты движущейся точки x, y, z и x', y', z' связаны соотношением:

$$\begin{cases} x = x' + v_0 t \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad (1)$$

Время в обеих системах течет одинаково. Эти соотношения называются преобразованиями Галилея. Эти преобразования позволяют перейти от координат движущейся точки в одной системе отсчета к другой, если система координат движется прямолинейно и равномерно друг относительно друга (в соответствии с рисунком 1).

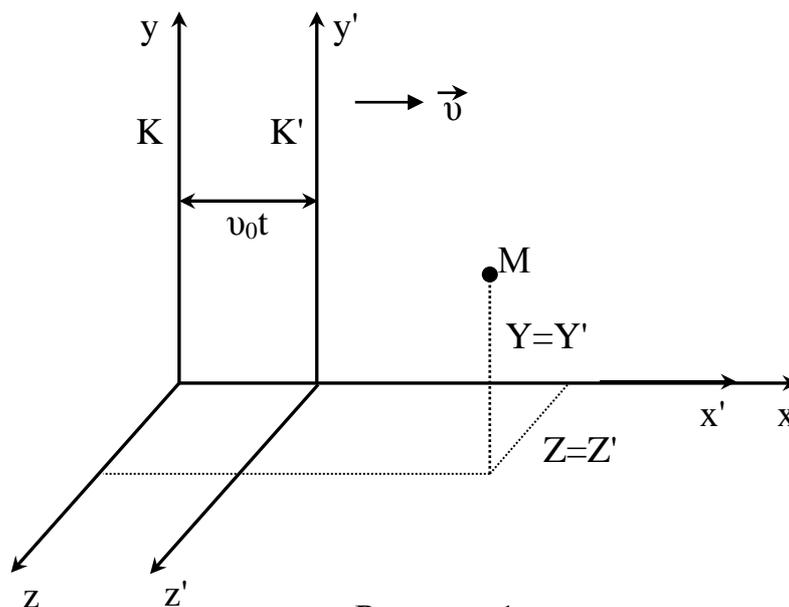


Рисунок 1

Продифференцировав соотношение (1) во времени, найдем связь между скоростями точки М по отношению к системам отсчета К и К'.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v_0 \\ \frac{dy}{dt} = \frac{dy'}{dt} \\ \frac{dz}{dt} = \frac{dz'}{dt} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} v_x = v'_x + v_0 \\ v_y = v'_y \\ v_z = v'_z \end{array} \right. , \quad (2)$$

выражение (2) является **формулами** сложения скоростей в классической механике. Скалярное соотношение $v_x = v'_x + v_0$ можно заменить соотношением между *векторами скорости по отношению к неподвижной и подвижной системе* отсчета

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0$$

где \vec{v} – скорость абсолютного движения, м/с;

\vec{v}' – скорость относительного движения;

\vec{v}_0 – скорость переносного движения.

Дифференцируя равенство (2) получаем (с учетом того, что $dt = dt'$)

$$\left\{ \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2x'}{dt'^2}; \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2y'}{dt'^2}; \quad \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{d^2z'}{dt'^2} \right. , \quad (3)$$

или $\vec{a}_x = \vec{a}'_x$; $\vec{a}_y = \vec{a}'_y$; $\vec{a}_z = \vec{a}'_z$.

Эти выражения показывают, что ускорение инвариантно относительно преобразования Галилея. Величины, численное значение которых не изменяется при преобразовании координат, называются инвариантами преобразований. Они имеют первостепенное значение в физической теории. Поэтому необходимо изучить инварианты преобразований Галилея. Т.о., выражение (3) показывает, что ускорение какого-либо тела во всех системах отсчета, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно оказывается одним и тем же.

Система отсчета, движущаяся прямолинейно и равномерно относительно неподвижной, называется инерциальной системой отсчета. С механической точки зрения все инерциальные системы совершенно эквивалентны. Любую из них можно положить покоящейся, а скорости всех остальных систем определить относительно неё. Практически это проявляется в том, что никакими механическими опытами, проведенными в пределах данной системы отсчета, нельзя установить, находится ли она в состоянии покоя или в состоянии равномерного и прямолинейного движения (свободное падение тел происходит одинаково как в движущемся, так и в неподвижном вагоне). Это положение носит название *механического принципа относительности Галилея*. В дальнейшем, в результате изучения других явлений, в частности электромагнитных, справедливость этого положения была признана для любых явлений. В таком виде оно называется принципом относительности специальной теории относительности или просто принципом относительности.

Пусть в K системе координат (в соответствии с рисунком 2) находится стержень, координаты концов которого x_1' и x_2' . Это означает, что длина стержня в штрихованной системе равна $l' = x_2' - x_1'$.

В системе K стержень движется поступательно со скоростью \vec{v}_0 .

Одновременно, определяем координаты концов x_1 и x_2 стержня в системе K .

Согласно формулам преобразования: $x_1 = x_1' + v_0 t$ и $x_2 = x_2' + v_0 t$, отсюда следует, что $x_2' - x_1' = x_2 - x_1$, т.е. длина стержня в системах K и K' – одинакова ($l = l'$). Это позволяет утверждать, что длина является инвариантом преобразований Галилея.

В преобразованиях Галилея $t = t'$, т.е. утверждение об одновременности двух событий имеет абсолютный характер, независимый от системы координат.

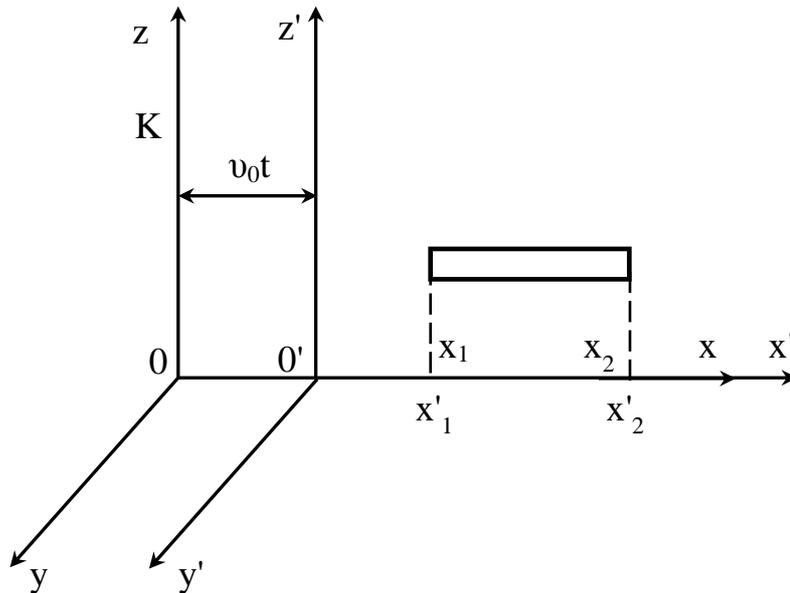


Рисунок 2

Инвариантность интервала времени доказывается на основании формулы преобразования $t = t'$. Пусть в системе K' произошли события в некоторые моменты t'_1 и t'_2 . Интервал времени между этими событиями $\Delta t' = t'_2 - t'_1$. В неподвижной координат эти события произошли в момент $t_1 = t'_1$ и $t_2 = t'_2$, следовательно, интервал времени между ними $\Delta t = t_2 - t_1 = t'_2 - t'_1 = \Delta t'$.

Таким образом, можно сказать, что интервал времени является инвариантом преобразований Галилея.

Все классические величины, характеризующие механическое движение, механика разделила на два класса: абсолютные (инвариантные) и относительные (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Абсолютные и относительные величины.

Абсолютные (инвариантные)	Относительные
Время t	Траектория S
Масса m	Координата x
Длина $l = x_2 - x_1$	Скорость $v = \frac{\partial x}{\partial t}$
Ускорение $a = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$	
$\vec{F} = m\vec{a}$	

2. Классический принцип относительности и скорость света

Двадцатое столетие застало ученых в приятном заблуждении. Им казалось, что они знают все или почти все об окружающем мире. Плечами таких гигантов, как Галилей и Ньютон, была поднята стройная система человеческих знаний.

В физике были установлены главнейшие законы, охватывающие, как думалось, все стороны жизни вселенной. Это величественное здание, получившее название классической физики, казалось, вмещало в себя разгадки всех, раскрытых и нераскрытых, тайн природы. В основе классической физики лежали две гипотезы – атомистическая и эфирная.

Согласно атомистической теории все вещества образованы из мельчайших частиц-атомов. Эфир же вошел в науку с легкой руки Френеля.

Инженер Службы дорог и мостов, вынужденный уединиться в деревне после «чистки» 1815 года, проведенный наполеоновским правительством, раньше и не думавший заниматься физикой, Френель на досуге много и глубоко размышлял о тайнах света. И вот, проведя серию экспериментов со светом, Френель понял, что, исходя из буквальной аналогии света со звуком, невозможно объяснить ряд наблюдаемых явлений. Он вынужден был предположить, что свет – это не продольные колебания и переносить их в мировом пространстве может только особая среда со свойствами твердого тела.

Эта среда была названа эфиром. Эфир прозрачен как воздух и должен быть по свойствам тверже стали, и чуть ли не в сто- тысяч раз более упругим, чем сталь. Френель предположил, что световые волны аналогичны поперечным волнам в твердых телах. Усовершенствованная таким образом волновая теория света объясняла все известные науке факты. Правда, введение эфира в науку несло и новые трудности – он был неуловим, невозможно было объяснить его чрезвычайную упругость, вместе с ним он должен был обладать «бестелесностью привидения», через него можно было

беспрепятственно проходить. Всё это принудило ученых признать эфир исключительной средой, обладающей крайне противоречивыми свойствами. Эфир надолго пережил своего родителя. Френель, сломленный туберкулезом, умер в 39 летнем возрасте в полной уверенности, что эфир существует.

Модель эфира, как абсолютно упругой среды, наталкивалась на серьезные затруднения. Тем не менее, предполагалось, что эти трудности переходящие, что рано или поздно надеждами. Усовершенствование средств наблюдения, новые методы экспериментальной техники привели к открытиям, которые не укладывались в привычные схемы классической физики. Возникла проблема более четкого формулирования основных принципов физики.

В конце прошлого века со всей определенностью встал вопрос: можно ли говорить об абсолютном движении тел и существует ли понятие абсолютной скорости тела?

Такая постановка вопроса не является абсурдной, ибо на него можно дать точный ответ, лишь строго установив систему отсчета, по отношению к которой определяется скорость движущегося тела.

Логичным было бы взять за систему отсчета эфир, заполняющий всю вселенную. По отношению к этой единственной и универсальной системе отсчета можно говорить об абсолютном движении, об абсолютной скорости. Так, например, «абсолютную» скорость света и определяли по отношению к этому эфиру, считая его носителем электромагнитных волн.

Но как конкретно определить эту абсолютную скорость по отношению к эфиру для любого тела?

Эфир может увлекаться движущимися телами, а может оставаться неподвижным и не принимать участия в движении тел. Герц считал, что эфир полностью увлекается материальными телами при их движении. Это воззрение переносит механический принцип относительности в электродинамику и оптику. По Лоренцу – эфир не принимает участия в

движении материальных тел. Значит, для электродинамики и оптики принцип относительности не имеет места. Если существует «абсолютная» система отсчета, связанная с эфиром, то можно говорить об абсолютной скорости тел, и в первую очередь об абсолютной скорости света.

3. Постулаты специальной теории относительности

Эйнштейн пришел к выводу, что мирового эфира, т.е. особой среды, которая могла бы служить абсолютной системой отсчета, не существует. В соответствии с этим Эйнштейн распространил механический принцип относительности Галилея на все без исключения физические явления. Согласно принципу относительности Эйнштейна:

а) все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой.

б) скорость света в пустоте одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от движения источников и приемников света.

Принцип относительности и принцип постоянства скорости света образуют основу специальной теории относительности, которая представляет по существу физическую теорию пространства и времени.

В классической механике пространство и время рассматривались независимо друг от друга. Ньютон считал, что существует абсолютное пространство и абсолютное время [2].

4. Понятие пространства и времени

Пространство и время (P и B) – это всеобщие формы существования материи. Все вещи и явления существуют в пространстве и во времени. Любое явление совершается в определенном месте и в определенное время.

Научные представления о пространстве и времени развились в связи с развитием представлений о материи, движении, взаимодействии. До XX века в науке использовались понятия пространства и времени, сформулированные Ньютоном. Согласно Ньютону, пространство существует сама по себе,

независимо от вещей. Оно представляет собой беспредельную пустоту, абсолютный вакуум, имеющий три измерения (длину, ширину, высоту).

Время, согласно Ньютону, есть длительность, также существующая сама по себе, независимо от того, происходят ли какие-нибудь события или не происходят.

Время течет безостановочно и равномерно от прошлого к будущему. Течение времени ни от чего не зависит, оно везде одинаково. Поэтому Ньютон называет его абсолютным. Такое понятие пространства и времени исходит из того, состоящую из абсолютно низменных и неделимых частиц, разделенных, пустотой. Без пустоты (абсолютного пространства) атомистическая картина была бы невозможна. Эти понятия *П* и *В* были господствующими в течении двух веков.

Философы Лейбниц и Гегель отказались от абсолютного *П* и *В*, как существующих независимо от движущейся материи и рассматривали их, как формы существования тел и явлений. В дальнейшем положение о неразрывности понятий *П*, *В* и материи получило свое развитие в теории относительности.

Современная физическая теория *П* и *В* подтверждает основные положения диамата, что *П* и *В* формы существования материи, а не особые реальности, существующие наряду с материей и независимо от нее, как полагал Ньютон. Пространство – всеобщая форма существования тел. Время – всеобщая форма смены состояний материи [4].

О времени Ньютон писал: «Абсолютное, истинное или математическое время само по себе и в силу своей внутренней природы течет равномерно безотносительно к чему - либо внешнему».

В соответствии с этим считалось совершенно очевидным, что два события одновременные в какой-либо системе отсчета, будут одновременными и во всех остальных системах отсчета. Однако, легко убедиться в том, что последнее утверждение находится в противоречии с принципом постоянства скорости света.

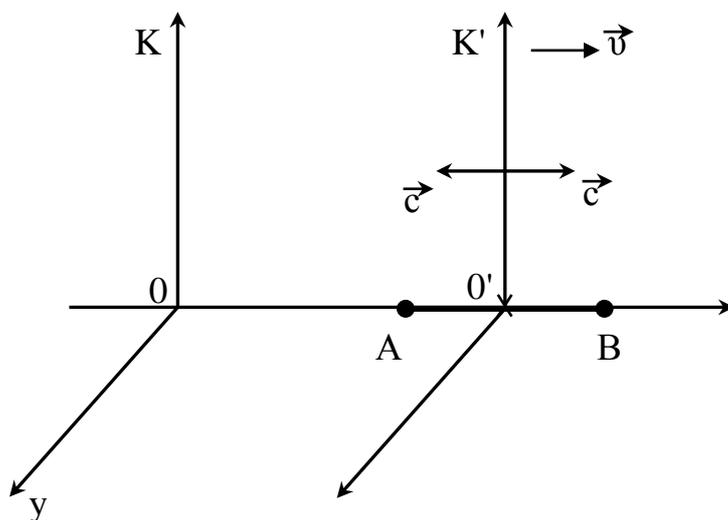


Рисунок 3

Возьмем две инерциальные системы отсчета K и K' (рисунок 3). K' движется со скоростью \vec{v} . В момент времени $t = 0$ испущен световой сигнал в O .

1. Приемник света, тела A и B покоятся относительно K' световой сигнал будет достигать и A и B в одно тоже время. (c – во всех направлениях одинакова).

2. Теперь рассмотрим этот процесс в системе K . Относительно этой системы свет так же распространяется по всем направлениям со скоростью c .

Тело A движется навстречу лучу света, тело B лучу приходится догонять. Поэтому тело A луч достигнет раньше, чем тело B . Таким образом события, которые в системе K' были одновременными, в системе K – оказываются неодновременными. Отсюда вытекает, что время в разных системах течет неодинаковым образом. Таким образом, время из класса инвариантных величин переходит в класс относительных.

Может возникнуть сомнение: не приведет ли нас подобный вывод к бессмыслице? Поскольку понятие одновременности относительно, то может случится так, что с точки зрения одной системы отсчета в начале стреляет ружье, а затем падает птица, а с точки зрения другой – сначала падает птица, а затем стреляет ружье?

Анализ показывает, что относительность последовательности событий ограничена скоростью распространения взаимодействия (меньшей, чем c).

Поэтому «раньше» или «позже» могут меняться местами лишь в тех случаях, когда они не находятся в причинной связи (т.е. не являются результатом взаимодействия). Эйнштейн обратил внимание на то, что утверждение об одновременности двух событий, как и всякое другое физическое утверждение, нуждается в экспериментальной проверке. Чтобы описать событие в некоторой системе отсчета, нужно указать в каком месте и в какое время оно происходит. Эта задача окажется осуществимой, если в каждой точке пространства поместить метку, указывающую координаты, а также часы, по которым можно было бы отметить момент времени, в который происходит событие в данном месте. Чтобы сравнить моменты времени, в которые происходят два события в разных точках пространства, нужно убедиться, что часы, находившиеся в этих точках, идут синхронно. Это можно сделать, посылая от одних часов к другим световой сигнал.

Пусть из точки A в момент времени t_1 (отсчитанный по часам в A) посылается световой сигнал, который отражается от зеркала в точке B и возвращается в A в момент t_2 .

Часы в B нужно считать синхронными с часами A , если в момент прихода до них сигнала, часы B показывали время $t = (t_1 + t_2)/2$; такую сверку необходимо сделать для всех часов, расположенных в разных точках системы K . События в A и B будут считаться одновременным в системе K , если соответствующие им отсчеты времени по часам A и B совпадут. Аналогично производится синхронизация часов в системе K' и в любой другой инерциальной системе отсчета.

Скорость светового сигнала, с помощью которого осуществляется синхронизация, во всех инерциальных системах одна и та же. Этим обусловлен выбор в качестве сигнала для синхронизации именно светового сигнала. Оказывается, что так как скорость света является предельной, то никакой сигнал, никакое воздействие одного тела на другое не могут распространяться со скоростью, превышающую скорость света. Этим и объясняется одинаковость скорости света во всех системах отсчета.

Согласно принципу относительности законы природы во всех системах должны быть одинаковы. Тот факт, что скорость сигнала не может превышать предельного значения – есть тоже закон природы. Поэтому значение предельной скорости должно быть одинаково во всех системах отсчета.

5 Преобразования Лоренца

Закон сложения скоростей в *классической* механике находится в противоречии с принципом постоянства скорости света. Действительно, если в K' световой сигнал распространяется со скоростью света $v_x' = c$, то в системе K $v = v_x' + v_0 = c + v_0$, то есть превзойдет c . Отсюда вытекает, что преобразования Галилея должны быть заменены другими формулами. Для нахождения относительных величин Эйнштейн воспользовался вместо преобразований Галилея преобразованиями Лоренца. Мы не будем специально рассматривать, как Лоренц получил эту систему преобразований, напомним лишь конечный результат.

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (4)$$

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (5)$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (6)$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (7)$$

6 Следствия из преобразований Лоренца

6.1 Одновременность событий в разных системах отсчета

Пусть в системе K в точках с координатами x_1 и x_2 ; одновременно происходят два события в момент времени $t_1=t_2=t$. В системе K' этим событиям соответствуют координаты:

$$x_1' = \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1-\beta^2}}; \quad x_2' = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1-\beta^2}}; \quad (8)$$

и моменты времени:

$$t_1' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x_1}{\sqrt{1-\beta^2}}; \quad t_2' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x_2}{\sqrt{1-\beta^2}}; \quad (9)$$

В случае, если события происходят в одном и том же месте пространства, т.е. $x_1 = x_2$, то они будут совпадать и в пространстве ($x_1' = x_2'$) и во времени ($t_1' = t_2'$) и в системе K' .

Если же события в системе K пространственно разобщены ($x_1 \neq x_2$), то и в системе K' они тоже будут пространственно разобщены: ($x_1' \neq x_2'$) и не будут одновременными ($t_1' \neq t_2'$).

Знак разности ($t_2' - t_1'$) определяется знаком выражения $v \cdot (x_1 - x_2)$, следовательно, в разных системах K' (при разных v) разность ($t_2' - t_1'$) будет различна по величине и может различаться по знаку. Это означает, что в одних системах событие №1 будет предшествовать событию №2, а в других наоборот.

Сказанное относится лишь к событиям, между которыми отсутствует причинная связь. Причинно связанные события - (выстрел и попадание в мишень) ни в одной системе отсчета не будут одновременными и во всех системах событие, являющееся, причиной, будет предшествовать следствию. Таким образом, время инвариантных величин переходит в класс относительных [3].

6.2 Длина тел в разных системах отсчета

Рассмотрим стержень, покоящийся относительно системы K' . Длина его в этой системе равна $l_0 = x'_2 - x'_1$, где x'_1 и x'_2 — неизменяющиеся со временем t координаты концов стержня (рисунок 4).

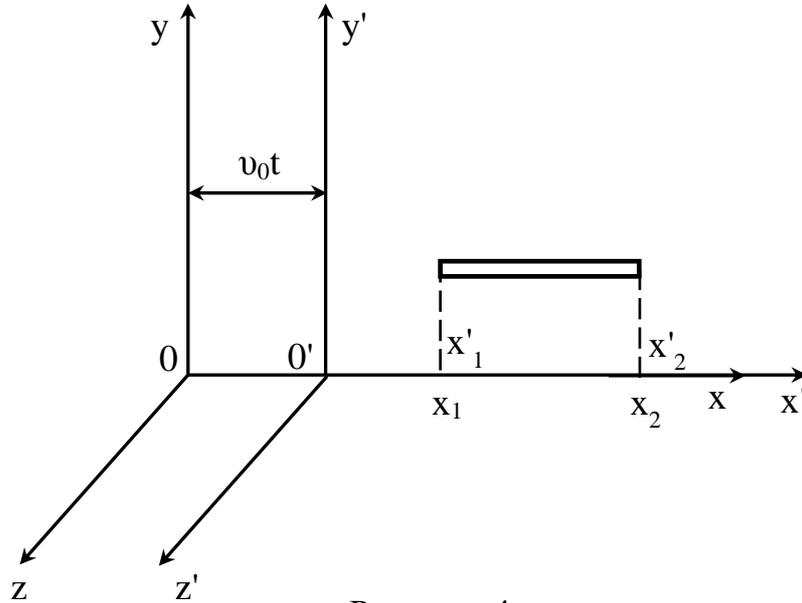


Рисунок 4

Относительно системы K стержень движется со скоростью \vec{v} . Для определения его длины в этой системе нужно отметить координаты концов стержня x_1 и x_2 в один и тот же момент времени $t_1 = t_2 = t$. Их разность $l = x_2 - x_1$, даст длину стержня, измеренную в системе K .

Чтобы найти соотношение между l и l_0 следует взять формулу преобразований Лоренца, которая содержит x'_1 , x'_2 и t , то есть

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (10)$$

Или окончательно :

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (11)$$

Таким образом, длина стержня l , измеренная в системе, относительно которой он движется, оказывается меньше длины l_0 , измеренной в системе, относительно которой стержень покоится (следовательно, и длина из класса

инвариантных (абсолютных) величин переносится в класс относительных) [3].

7 Теорема сложения скоростей в специальной теории относительности

Пусть тело движется по отношению к системе K' со скоростью U' , причем \vec{v} - скорость движения K' по отношению к K . Тогда

$$U = \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial \left(\frac{x' + vt'}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)}{\partial \left(\frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)} = \frac{\frac{\partial x' + vt'}{\sqrt{1-\beta^2}}}{\frac{\partial t' + \frac{v}{c^2}\partial x'}{\sqrt{1-\beta^2}}} = \frac{\partial x' + v\partial t'}{\partial t' + \frac{v}{c^2}\partial x'} = \frac{\frac{\partial x'}{\partial t'} + v}{\partial t' + \frac{v}{c^2}\partial x'} = \frac{\frac{\partial x'}{\partial t'}v}{c^2 + v\frac{\partial x'}{\partial t'}} = \frac{U' + v}{1 + v\frac{U'^2}{c^2}} \quad (12)$$

Таким образом, теорема сложения скоростей имеет вид

$$U = \frac{U' + v}{1 + v\frac{U'^2}{c^2}} \quad (13)$$

Пусть скорость U' равна c . Тогда U имеет значение

$$U = \frac{c + v}{1 + \frac{c+v}{c^2}} = c \quad (14)$$

Этот результат не является удивительным, т.к. в основе преобразований Лоренца лежит утверждение, что скорость света одинакова во всех системах отсчета [4].

Специальную теорию относительности часто называют теорией Эйнштейна. Однако нельзя говорить о создании теории относительности, не упомянув имена Лоренца и Анри Пуанкаре. Работа Лоренца 1904 года, посвященная электродинамике движущихся тел, фактически уже включала в неосознанном полностью виде содержание специальной теории относительности.

А. Пуанкаре же еще в 1902 году в своей книге “Наука и гипотеза” выдвинул принцип относительности для всех физических явлений. Пуанкаре являлся не только предшественником Эйнштейна, но и непосредственно одним из создателей теории относительности. В работе, написанной в 1905

году, он дает изложение теории относительности в строгой математической форме.

Статья Пуанкаре включала не только содержание параллельной ей работы Эйнштейна, но и более позднюю работу Минковского, превосходя ее в некоторых пунктах, касающихся использования строго математического языка теории групп. Парадоксальная ситуация с меньшей по сравнению с Эйнштейном популярностью Пуанкаре, как одного из создателей теории относительности, очевидно составит предмет исследования историков и биографов будущем.

8 Опытные подтверждения принципа постоянства скорости света

Астрономами доказано существование двойных звезд, в которых два небесных тела близкой массы вращаются вокруг общего центра тяжести. Имеются средства измерять расстояние между звездами, их массы, и скорости, следить за их относительным движением.

Если бы скорость света зависела бы от скорости звезды, то при движении в сторону земного наблюдателя скорость света складывалась бы со скоростью небесного тела, при обратном движении – скорости вычислялись. В этом случае земному наблюдателю представлялось бы, что движение по одной половине орбиты происходит быстрее, чем по другой. Вращение звезд приобрело бы причудливый характер. Периодическое вращение двойных звезд может быть понято только на основе принципа постоянства скорости света. Правда, здесь речь шла о движении источника света, и поэтому могли остаться сомнения в справедливости принципа постоянства скорости для движения наблюдателя. Эти сомнения рассеиваются другим астрономическим наблюдением – периодичностью движения спутников Юпитера.

Измерения движения спутников Юпитера можно произвести в двух случаях, когда свет идущий от Юпитера к Земле, совпадут с направлением

движения солнечной системы и противоположен ему. Тожественность наблюдений и четкая картина периодичности, связанная с годовым движением Юпитера, показывают справедливость принципа постоянства скорости света и в этом случае.

Наиболее существенную роль в развитии теории относительности сыграл опыт, произведенный Майкельсоном в 1881 году при помощи сконструированного им интерферометра. Опыт заключается в следующем (рисунок 5).

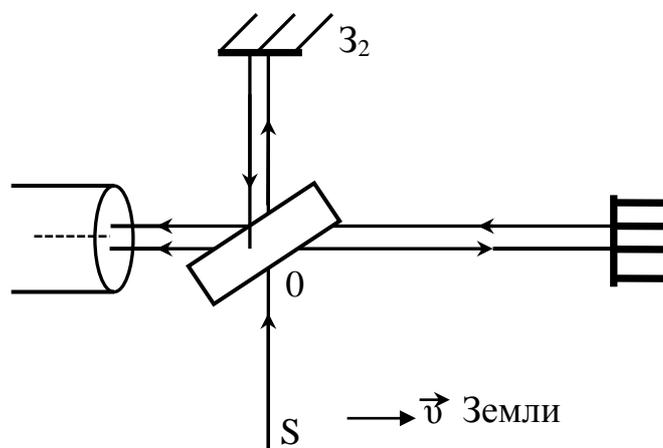


Рисунок 5

Пучок монохроматического света от источника S на пластинке раздваивается, и одна его часть идет по пути OZ_1O , а другая OZ_2O . Затем эти пучки собираются в фокальной плоскости зрительной трубы, где и наблюдается интерференционная картина. Были получены следующие результаты;

$$\text{а) туда } \rightarrow ct_1 = l_1 + vt_1; \quad t_1 = \frac{l_1}{c(1 - \frac{v}{c})};$$

$$\text{б) обратно } \leftarrow ct_2 = l_1 - vt_2; \quad t_2 = \frac{l_1}{c(1 + \frac{v}{c})};$$

Они показали, что никакого сдвига интерференционной картины не происходит, то есть, никакого влияния движения Земли на скорость света обнаружить не удалось. В этом и заключается неожиданный результат опыта. Вернемся еще раз к (а) и (б): Майкельсон расположил прибор таким

образом, чтобы OZ_1 совпадал с направлением движения Земли, а OZ_2 был ему перпендикулярен. А затем, заметив расположение интерференционных полос, экспериментатор повернул прибор на 90° , благодаря чему с направлением движения планеты совпала линия OZ_2 .

Если бы Земля не двигалась, такой поворот не мог бы никак повлиять на расположение полос наблюдаемой в трубе интерференционной картины. Но движение Земли, согласно представлениям классической физики, должно обязательно сказаться (и при том неодинаково!) на времени прохождения светом путей OZ_1O и OZ_2O .

Один из таких путей (OZ_1O) параллелен Земле. На прохождение его в ту сторону, куда движется Земля, затрачивается больше времени, т.к. свет должен догонять (убегающее) от него зеркало. На преодоление расстояния l нужно время

$$t_1 = \frac{l_1}{c-v}; \quad (15)$$

где c – скорость света, v – скорость движения Земли.

На прохождение света в обратном направлении (навстречу движению Земли) затрачивается меньше время

$$t_2 = \frac{l_1}{c+v}. \quad (16)$$

Всего нужно времени:

$$t_{11} = t_1 + t_2 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = \frac{2l_1 c}{c^2 - v^2}. \quad (17)$$

или

$$t_{11} = \frac{2l_1}{c} \cdot \frac{1}{1-\beta^2} = \frac{t_0}{1-\beta^2}, \quad (18)$$

где, $t_2 = \frac{2l_1}{c}$ – время прохождения участка OZ_1O неподвижного прибора;

$\beta = \frac{v}{c}$ - отношение скорости Земли к скорости света.

Другой путь (OZ_2O) перпендикулярен движению Земли. С учетом движения Земли этот путь в главной системе отсчета имеет вид OZ_2O (рисунок б).

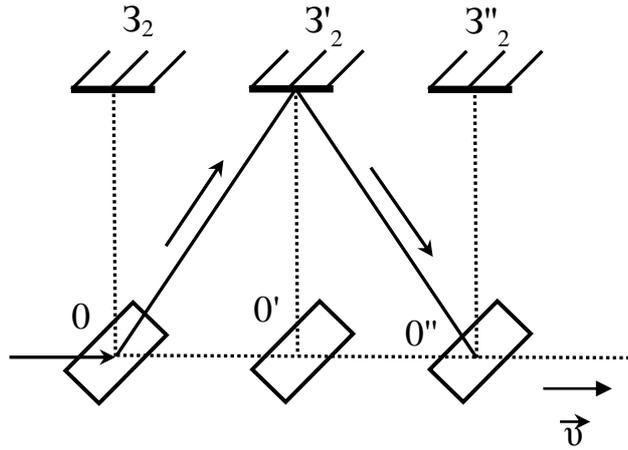


Рисунок 6

Пока свет идет от O к Z_2 это зеркало переместится в Z_2'' когда свет возвратится к полупрозрачной пластине, она окажется в точке O'' . Реальный путь света оказывается больше удвоенной длины плеча, а время $2t_0$. Обозначим время, фактически затрачиваемое на прохождение OZ_2 в одном направлении, через t .

Тогда отрезок $OZ_2=ct$, а $O'' = vt$.

Плечо $l = O'Z_2' = \sqrt{c^2t^2 - v^2t^2} = t\sqrt{c^2 - v^2}$, отсюда

$$t = \frac{l}{\sqrt{c^2 - v^2}},$$

Следовательно, полное время прохождения пути OZ_2O'' будет

$$t = 2t = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где $\beta = \frac{v}{c}$,

$$t_{11} = \frac{2l_1}{c} \cdot \frac{1}{1 - \beta^2}. \quad (19)$$

Сравнивая эти выражения, видим, что $t_{11} >$ чем (t)

$$\frac{t_{11}}{t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} > 1, \quad (20)$$

То есть свет быстрее проходит то плечо прибора, которое расположено перпендикулярно скорости движения Земли. Это вызывает определенное смещение интерференционных полос по сравнению со случаем

неподвижного прибора. После поворота прибора на 90° благодаря чему плечи обменялись местами, следует ожидать такого же смещения полос в противоположную сторону.

Однако и первый, и все последующие опыты Майкельсона показали, что никакого сдвига интерференционной картины не происходит, и никакого влияния движения Земли на скорость света обнаружить не удалось. В этом и заключался неожиданный результат опыта [1].

Вернемся еще раз к опыту

$$t_{11} = \frac{2l_1}{c(1-\beta^2)};$$

$$t = \frac{2l_2}{c\sqrt{1-\beta^2}},$$

где $\beta = \frac{v}{c}$.

При первом измерении плечи l_1 и l_2 подбираются так, что лучи затрачивают одинаковое время на отдельные пути. Значит

$$\frac{2l_1}{c(1-\beta^2)} = \frac{2l_2}{c\sqrt{1-\beta^2}}$$

или

$$l_2 = \frac{l_1}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

При втором опыте, т.е. при повороте интерферометра на 90° , сдвига интерференционной картины нет и времена прохождения остаются по-прежнему равными, хотя плечи l_1 и l_2 поменялись местами. В этом и заключается неожиданный результат опыта. Итак, если первое плечо установлено продольно, то

$$l_1 = l_2\sqrt{1-\beta^2}.$$

Если второе плечо установлено продольно

$$l_2 = l_1\sqrt{1-\beta^2},$$

То при $v = 0$ $l_1 = l_2$, но при $v \neq 0$ мы приходим к замечательному результату: длина одного и того же отрезка меняется в зависимости от того,

установлен этот отрезок вдоль движения или поперек движения. Полученный результат справедлив для любого тела, для любого расстояния между двумя точками.

Итак, первое следствие из теории относительности: движущееся по отношению к инерциальному наблюдателю тело сокращает свой размер в направлении движения. Поперечные размеры остаются неизменными.

Таким образом, длина стержня l и общее расстояние между точками – относительные понятия. Из всех длин стержня, измеренных в различных инерциальных системах выделяется длина покоя l_0 . Эта максимальная длина стержня имеет абсолютный смысл.

9 Элементы релятивистской динамики

Уравнения классической механики инвариантны по отношению к преобразованиям Галилея. По отношению к преобразованиям Лоренца они оказываются не инвариантными. Из теории относительности следует, что уравнение динамики, инвариантное по отношению к преобразованиям Лоренца имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = F, \quad (21)$$

где m_0 - масса покоя частицы, кг;

v - скорость частицы, м/с;

F - сила, действующая на частицу, Н.

Сопоставляя (21) с классическим уравнением $\frac{\partial p}{\partial t} = F$, мы приходим к выводу, что $p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\beta^2}} = mv$, т.е. масса частицы зависит от скорости

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Итак, масса из класса инвариантных величин переходит в класс относительных (см. таблицу 1).

9.1 Энергия. Закон пропорциональности

Вычислим энергию движущегося тела с учетом поправок, которые дала теория относительности. Работа перемещения тела на пути ∂l равна

$$F\partial t = \frac{\partial p}{\partial t} \partial l = v\partial p$$

Если эта работа идет на увеличение энергии тела E , то

$$\partial E = v\partial p = v\partial(mv) = v^2\partial m + mv\partial v, \quad (22)$$

Так как

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

где $\beta = \frac{v^2}{c^2}$, $m_0 - const$,

$$\text{то } \partial m = m' = \frac{m_0' \sqrt{1-\beta^2} - m_0 (\sqrt{1-\beta^2})'}{1-\beta^2} = -\frac{m_0 (\sqrt{1-\beta^2})'}{1-\beta^2};$$

$$(\sqrt{1-\beta^2})' = \frac{1}{2} (1-\beta^2)^{-1/2} \beta' = \frac{1}{2} (1-\beta^2)^{-1/2} \frac{2v\partial v}{c^2} = \frac{v\partial v}{c^2 \sqrt{1-\beta^2}};$$

$$m' = \frac{m_0 v \partial v}{(1-\beta^2) c^2 (1-\beta^2)} = -\frac{mv \partial v}{c^2 \sqrt{1-\beta^2}} \quad (23)$$

Знак (-) свидетельствует о том, что энергия увеличивается за счет затраты работы. Работа идет на увеличение энергии.

Подставляем (23) в (22) и получаем

$$\partial E = mv\partial v + \frac{v^2 mv \partial v}{c^2 (1-\beta^2)} = mv\partial v \left(1 + \frac{v^2}{c^2 (1-\beta^2)} \right) = \frac{mv \partial v}{1-\beta^2} \quad (24)$$

Интегрирование соотношения (24) дает

$$\partial E = c^2 \partial m,$$

$$E = mc^2 + const \quad (25)$$

т.е. работа идет на увеличение энергии. Закон (25) получил название *закона пропорциональности*.

Фундаментальный результат этого закона заключается в следующем: увеличение массы тела сопровождается увеличением его энергии (а значит и

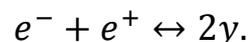
затрат энергии со стороны), напротив, уменьшение массы тела или системы сопровождается уменьшением его энергии (а значит передачи ее окружающим). Между приращением массы и приращением энергии имеется прямое универсальное соотношение, поскольку c^2 есть постоянное число. Какой смысл следует придать энергии E ? Является ли она энергией движения? Нет.

Если тело покоится, то E обращается не в нуль, а в E_0 – энергия покоящегося тела, т.е. внутренняя энергия.

В обычных условиях изменения энергии приводят к очень малым изменениям в массе: почти никогда не удастся из данного количества вещества извлечь много энергии: в атомной бомбе, эквивалентной 20000 тонн тринитротолуола, весь пепел, осевший после взрыва, на 1 грамм легче первоначального количества расщепляющегося материала. Это потому, что выделилась энергия, которая имела массу в 1 грамм в соответствии с формулой

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

Вывод о пропорциональности массы и энергии прекрасно подтвердился в опытах по взаимному превращению материи. Электрон с позитроном могут взаимодействовать в покое, имея каждый массу покоя m_0 . При взаимодействии они аннигилируют с образованием двух гамма – квантов, каждый опять с энергией m_0c^2



Этот опыт прямо сообщает нам о величине энергии, связанной с существованием массы покоя у частицы.

9.2 Философское значение закона пропорциональности

Этот закон связывает два фундаментальных свойства любых материальных объектов: массу и энергию, которые ранее мыслились как независимые друг от друга.

Формула $E = mc^2$ ярко выявляет внутреннюю диалектику, присущую основным физическим понятиям, является одним из воплощений того единства противоположностей, которое пронизывает всю современную физику.

Масса характеризовала инерцию материальных объектов, присущую им устойчивость, энергия – напротив: способность к совершению работы, она представляет физическую меру движения. Формула $E = mc^2$ связывает эти противоположные характеристики, выявляя их внутреннюю связь [4].

10 Тест для самопроверки

1. Согласно специальной теории относительности инвариантными относительно инерциальной системы отсчета являются

- а) пространственно-временной интервал между событиями
- б) длина и масса тела
- в) отрезок времени между двумя событиями
- г) скорость света

2. Специальная теория относительности утверждает относительный характер...

- а) одновременности событий
- б) скорости света в вакууме
- в) заряда электрона
- г) массы, длины

3. К инерциальным системам отсчета относятся ...

- а) системы, движущиеся равномерно и прямолинейно
- б) системы, движущиеся ускоренно
- в) системы, в которой не выполняются законы классической механики
- г) покоящиеся системы

4. Согласно специальной теории относительности ...

- а) при увеличении скорости движения тела его длина относительно неподвижной системы отсчета растёт
- б) невозможно разогнать тело с массой покоя отличной от нуля до скорости света
- в) переход от одной инерциальной системы к другой осуществляется с помощью преобразований Галилея
- г) передача физических взаимодействий со сверхсветовой скоростью привела бы к нарушению причинно-следственной связи

5. Из преобразований Галилея следует, что при переходе от одной инерциальной системы к другой неизменными остаются ...

- а) время
- б) скорость
- в) масса
- г) координата

6. Из преобразований Лоренца следует, что при увеличении скорости подвижной системы отсчета относительно неподвижной

- а) масса тела относительно неподвижной системы отсчета убывает
- б) пространственно-временной интервал между событиями увеличивается
- в) ход времени относительно неподвижной системы замедляется
- г) длина отрезка в направлении движения уменьшается относительно неподвижной системы

7. В специальной теории относительности справедливы следующие утверждения:

- а) инвариантами относительно изменения системы отсчета являются время и масса
- б) физические процессы в движущейся системе отсчета ускоряются относительно неподвижной системы
- в) пространственно-временной интервал между событиями является инвариантным относительно изменения системы отсчета
- г) невозможна передача взаимодействий со скоростью, превышающей скорость света

8. Следствием специальной теории относительности являются

- а) искривление светового луча в поле тяготения
- б) инвариантность промежутка времени относительно изменения системы отсчета
- в) относительность понятия одновременности событий
- г) эквивалентность массы и энергии

9. Основу специальной теории относительности составляют следующие постулаты: ...

- а) скорость света в вакууме постоянна и не зависит от движения источника и приемника света
- б) все физические процессы во всех инерциальных системах отсчета протекают одинаково
- в) все механические процессы во всех инерциальных системах отсчета протекают одинаково
- г) скорость света постоянна в областях, где можно пренебречь гравитационными силами

10. В теории относительности Эйнштейна утверждается, что пространство и время ...

- а) относительны
- б) абсолютны
- в) существуют независимо друг от друга
- г) существуют как единая четырехмерная структура

11. Из специальной теории относительности следует, что...

- а) когда скорость тела приближается к скорости света, его масса стремится к нулю
- б) с возрастанием скорости движения тела его масса увеличивается
- в) движущееся относительно наблюдателя тело имеет большую массу, чем покоящееся
- г) с увеличением скорости движения тела его масса уменьшается

12. Из специальной теории относительности следует, что...

- а) в движущейся относительно наблюдателя системе отсчета часы идут быстрее, чем в неподвижной
- б) в инерциальных системах отсчета с увеличением скорости движения темп времени замедляется
- в) в движущейся относительно наблюдателя системе отсчета часы идут медленнее, чем в неподвижной
- г) при приближении к скорости света все процессы в системе ускоряются

13. Инерциальными называются системы отсчета, относительно которых материальная точка без внешних воздействий ...

- а) движется по окружности
- б) движется равномерно и прямолинейно
- в) покоится
- г) движется с ускорением

14. Из специальной теории относительности следует, что ...

- а) движущееся относительно наблюдателя тело имеет больший размер, чем покоящееся
- б) с возрастанием скорости движения тела его линейный размер уменьшается
- в) движущееся относительно наблюдателя тело имеет меньший размер, чем покоящееся
- г) с возрастанием скорости движения тела его линейный размер увеличивается

15. Из специальной теории относительности следует, что ...

- а) линейный размер тела не зависит от скорости его движения
- б) с ростом скорости размер тела сокращается в направлении движения
- в) когда скорость тела приближается к скорости света, его линейный размер становится бесконечно большим
- г) когда скорость тела приближается к скорости света, его линейный размер стремится к нулю

11 Примеры решения задач

Задача 1. Собственное время жизни некоторой частицы $\Delta t_0 = 10$ нс. Найдите длину пути, который пролетит эта частица до распада в лабораторной системе отсчета, где ее время жизни составляет $\Delta t = 20$ нс.

Решение: Время жизни частицы в лабораторной СО:

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

За это время в лабораторной СО частица пролетит путь

$$l = \Delta t \cdot v.$$

Из этих уравнений найдем

$$l = c \sqrt{\Delta t^2 - \Delta t_0^2} \approx 5,2 \text{ м.}$$

Задача 2. Две частицы движутся друг за другом по одной прямой со скоростями $v = 0,75c$ относительно лабораторной системы отсчета и попадают в неподвижную мишень с интервалом времени, равным $\Delta t = 50$ нс по лабораторным часам. Найдите собственное расстояние между частицами до попадания в мишень.

Решение: В лабораторной системе отсчета расстояние между частицами

$$\Delta l = v \cdot \Delta t.$$

Тогда собственное расстояние между частицами

$$\Delta l_0 = \frac{\Delta l}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \frac{v \cdot \Delta t}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \approx 17 \text{ м.}$$

Задача 3. Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростями $0,9c$ каждая относительно лабораторной системы отсчета. Найдите скорость первой частицы относительно второй.

Решение: Свяжем K' - систему отсчета с одной из частиц и воспользуемся законом сложения скоростей

$$v'_x = \frac{v_x - V}{1 - \frac{V \cdot v_x}{c^2}}$$

В нашем случае $V = 0,9c$, $v_x = -0,9c$ и

$$v'_x = \frac{-1,8c}{1 + \frac{(0,9c)^2}{c^2}} = -0,9945c.$$

Задача 4. Найдите скорость, при которой кинетическая энергия релятивистской частицы равна ее энергии покоя.

Решение: Запишем выражения для кинетической энергии

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - E_0$$

и энергии покоя

$$E_0 = mc^2.$$

Учитывая, что $E_k = E_0$, получим

$$mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - mc^2.$$

Отсюда, $v = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)c$.

Задача 5. Собственное время жизни частицы отличается на 1% от времени жизни по неподвижным часам. Определите $\beta = v/c$.

Решение: По условию задачи

$$k = \frac{\Delta t - \Delta t_0}{\Delta t} = 0,01.$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \beta = \frac{v}{c},$$

$$k = 1 - \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = 1 - \sqrt{1-\beta^2},$$

$$1 - \beta^2 = (1 - k)^2,$$

Отсюда,

$$\beta = \sqrt{k(2 - k)} = 0,141.$$

12 Задачи для самостоятельного решения

1. Определить с какой скоростью должен двигаться автомобиль, чтобы он мог провалиться сквозь канализационную решетку (между ее прутьями). Собственная длина автомобиля – $l_0 = 5$ м, а расстояние между прутьями решетки – $l = 10$ см. Считать, что прутья решетки расположены перпендикулярно скорости движения автомобиля. (Ответ: $v = 0,9998c$)

2. Определить массу (движения) фотона красного света, если его энергия $E = 2,55 \cdot 10^{-19}$ Дж. (Ответ: $m \approx 2,83 \cdot 10^{-36}$ кг)

3. Оцените величину массы, которую ежегодно (1 год $\approx 3,2 \cdot 10^7$ с) теряет Солнце в результате излучения (фотонов), если мощность излучения Солнца – $P = 3,9 \cdot 10^{26}$ Вт. (Ответ: $\Delta m \approx 1,39 \cdot 10^{17}$ кг)

4. Определить возраст космонавта τ' , совершившего космический полет со скоростью $v=0,9c$, если время полета, измеренное по часам оставшимся на Земле, составило $\Delta t=5$ лет. Возраст космонавта в момент старта был $\tau=35$ лет. (Ответ: $\Delta t_0 \approx 2,18$ лет $\Rightarrow \tau'=\tau+\Delta t_0 \approx 37,18$ лет)

5. Определить массу (m) и кинетическую энергию (E_k) электрона, движущегося со скоростью $v=0,85c$. (Ответ: $m=1,9 \cdot m_0 \approx 17,3 \cdot 10^{-31}$ кг, $E_k \approx 0,9 \cdot m_0 c^2 \approx 7,4 \cdot 10^{-14}$ Дж, $m_0 \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона)

6. Электрон, разогнанный в бетатроне до скорости $v=0,98c$ (относительно бетатрона), неупруго сталкивается с неподвижной, относительно ускорителя, мишенью (т.е. захватывается ею). Найти какая энергия ΔE выделится в результате этого соударения? (Электрон в результате соударения не исчезает.) (Ответ: $\Delta E \approx 4,03 \cdot m_0 c^2 \approx 3,30 \cdot 10^{-13}$ Дж, $m_0 \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона)

7. Определить с какой скоростью (v) должен двигаться наблюдатель, чтобы два события, произошедшие на расстоянии $1,2 \cdot 10^9$ км через 1 час друг за другом, были бы для него одновременными событиями. (Ответ: $v=0,9c=270\,000$ км/с)

8. Определите, во сколько раз увеличивается время жизни нестабильной частицы (по часам неподвижного наблюдателя), если она начинает двигаться со скоростью $0,9c$. (Ответ: $\frac{\Delta t}{\Delta t_0} = 2,29$)

9. Определите относительную скорость движения, при которой релятивистское сокращение линейных размеров тела составляет 10%. (Ответ: $v = 1,31 \cdot 10^5$ км/с.)

10. Определите релятивистский импульс протона, если его скорость движения $v = 0,8c$. (Ответ: $p = 6,69 \cdot 10^{-19}$ Н · с.)

13 Контрольные вопросы

1. Какова физическая сущность механического принципа относительности?

2. В чём заключается правило сложения скоростей в классической механике?

3. Каковы причины возникновения специальной теории относительности?

4. В чём заключаются основные постулаты специальной теории относительности?

5. Запишите преобразования Лоренца. При каких условиях они переходят в преобразования Галилея?

6. Какой вывод о пространстве и времени можно сделать на основе преобразований Лоренца?

7. Какие следствия вытекают из специальной теории относительности для размеров тел и длительности событий в разных системах отсчета?

8. В чём заключается релятивистский закон сложения скоростей? Как показать, что он находится в согласии с постулатами Эйнштейна?

9. Какой вид имеет основной закон релятивистской динамики?

10. В чём заключается закон сохранения релятивистского импульса?

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

12. Сформулируйте и запишите закон взаимосвязи массы и энергии. В чём его физическая сущность?

Список использованных источников

1. Алешкевич, В.А. Механика твердого тела: лекции: Университетский курс общей физики / В.А. Алешкевич, Л.Г. Деденко, В.А. Караваев. – Изд-во физического факультета МГУ, 1998. – 12 с.

2. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3 т.-Т.1 : Механика. Молекулярная физика / И.В.Савельев. – М.: Наука, 1988. – 496 с.

3. Трофимова, Т.И. Курс физики : учебное пособие для вузов / Т.И.Трофимова. – М.: Высш.шк., 2001. – 542 с.

4. Калашников, Н.П. Основы физики: В 2 т.: Учебник для вузов / Н.П. Калашников, М.А. Смондырев. – 3-е изд., стер. – М.: Дрофа, 2007.
5. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Академия, 2007. – 720 с.
6. Кузнецов, С.И. Физические основы механики: Учеб. пособие. / С.И. Кузнецов – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 121 с.
7. Кузнецов, С.И. Краткий курс физики: Учеб. пособие. / С.И. Кузнецов – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 187 с.
8. Кузнецов, С.И. Курс физики с примерами решения задач. Основы механики: Учеб. пособие – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 249 с.
9. Матвеев, А.Н. Механика и теория относительности: Учеб. пособие. / А.Н. Матвеев – 4-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2009. – 336 с.