

8. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (СТО)

- 8.1. Принцип относительности Галилея. Закон сложения скоростей
- 8.2. Постулаты Эйнштейна
- 8.3. Преобразования Лоренца
- 8.4. Следствия из преобразований Лоренца
- 8.5. Релятивистская механика
- 8.6. Взаимосвязь массы и энергии покоя

8.1. Принцип относительности Галилея. Закон сложения скоростей

При изложении механики предполагалось, что все скорости движения тел значительно меньше скорости света. Причина этого в том, что механика Ньютона (называемая также классической) неверна, при скоростях движения тел, близких к скорости света ($v \rightarrow c$). Правильная теория для этого случая, называется релятивистской механикой или *специальной теорией относительности*.

Механика Ньютона оказалась замечательным приближением к релятивистской механике, справедливым в области $v \ll c$.

Большинство встречающихся в повседневной жизни скоростей значительно меньше скорости света. Но существуют явления, где это не так (ядерная физика, электромагнетизм, фотоэффект, астрономия и т.д.).

Согласно представлениям классической механики, *механические явления происходят одинаково в двух системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга.*

Найдем связь между координатами точки M в обеих системах отсчета. Отсчет начнем, когда начала координат систем – совпадают, то есть $t = t'$. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} x &= x' + vt' \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= t' \end{aligned} \right\} \quad (8.1.1)$$

Совокупность уравнений (8.1.1) называется ***преобразованиями Галилея***.

В уравнениях (8.1.1) время $t = t'$ – т. е. в классической механике предполагалось, что время течет одинаково в обеих системах отсчета независимо от скорости.

(«Существует абсолютное время, которое течет всегда одинаково и равномерно», – говорил Ньютон). В векторной форме преобразования Галилея можно записать так:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t. \quad (8.1.2)$$

Продифференцируем это выражение по времени, получим (рисунок 8.2):

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt} + \vec{v} \quad \text{или,}$$

$$\vec{v}_1 = \vec{v}' + \vec{v} \quad (8.1.3)$$

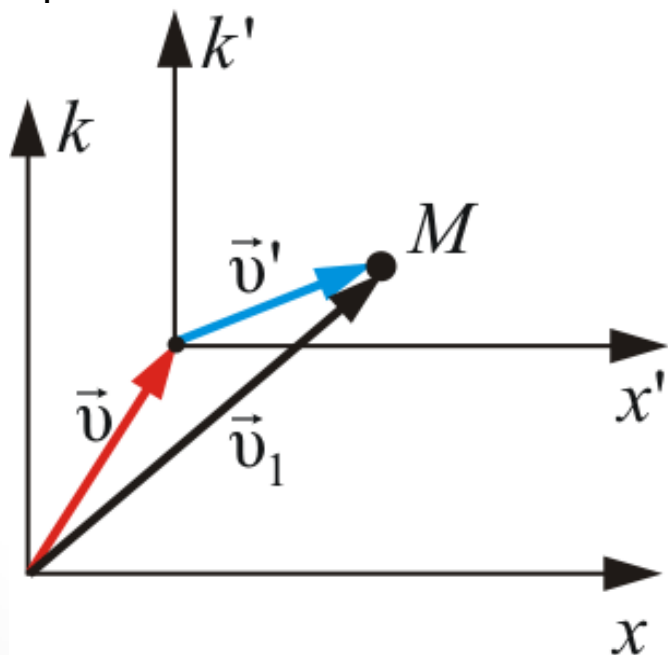


Рисунок 8.2

Выражение (8.1.3) определяет **закон сложения скоростей** в классической механике.

Скорость движения точки M (сигнала) \vec{v}' в системе k' и \vec{v}_1 в системе k различны.

Законы природы, определяющие изменение состояния движения механических систем не зависят от того, к какой из двух инерциальных систем отсчета они относятся. Это и есть принцип относительности Галилея.

Из преобразований Галилея и принципа относительности следует, что *взаимодействия в классической физике должны передаваться с бесконечно большой скоростью $c = \infty$* т. к. в противном случае можно было бы одну инерциальную систему отсчета отличить от другой по характеру протекания в них физических процессов.

Принцип относительности Галилея и законы Ньютона подтверждались ежечасно при рассмотрении любого движения, и господствовали в физике более 200 лет.

Но вот, в 1865 г. появилась теория Дж. Максвелла, и уравнения Максвелла не подчинялись преобразованиям Галилея. Ее мало кто принял сразу, она не получила признания при жизни Максвелла. Но вскоре все сильно изменилось, когда в 1887 г. после открытия электромагнитных волн Герцем, были подтверждены все следствия, вытекающие из теории Максвелла – ее признали. Появилось множество работ, развивающих теорию Максвелла.

Дело в том, что в теории Максвелла, скорость света (скорость распространения электромагнитных волн), конечна и равна $c = 299792458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (Исходя из принципа относительности Галилея скорость передачи сигнала \vec{v} бесконечна и зависит от системы отсчета $\vec{v}_1 = \vec{v}' + \vec{v}$)

Первые догадки о конечности распространения скорости света, были высказаны еще Галилеем. Астроном Рёмер в 1676 г. пытался найти скорость света. По его приближенным расчетам, она была равна $c = 214300000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Нужна была экспериментальная проверка теории Максвелла. Он сам предложил идею опыта – использовать Землю в качестве движущейся системы (Известно, что скорость движения Земли $v_3 \approx 30 \text{ км/с} \approx 3 \cdot 10^4 \text{ м/с}$ В 80-ых годах XIX века были выполнены опыты, которые доказали независимость скорости света от скорости источника или наблюдателя.

Необходимый для опыта прибор изобрел блестящий военно-морской офицер США – А. Майкельсон (рисунок 8.3).



Майкельсон Альберт Абрахам (1852 – 1931) – американский физик. Основные работы в области оптики и спектроскопии. Изобрел интерферометр (интерферометр Майкельсона), сыгравший значительную роль в обосновании специальной теории относительности и в изучении спектральных линий. Осуществил серию экспериментов по точному определению скорости света. Доказал при помощи оптического метода вращение Земли вокруг оси и определил скорость вращения.

Президент Американского физического общества. Член АН СССР. Лауреат Нобелевской премии в 1907 г

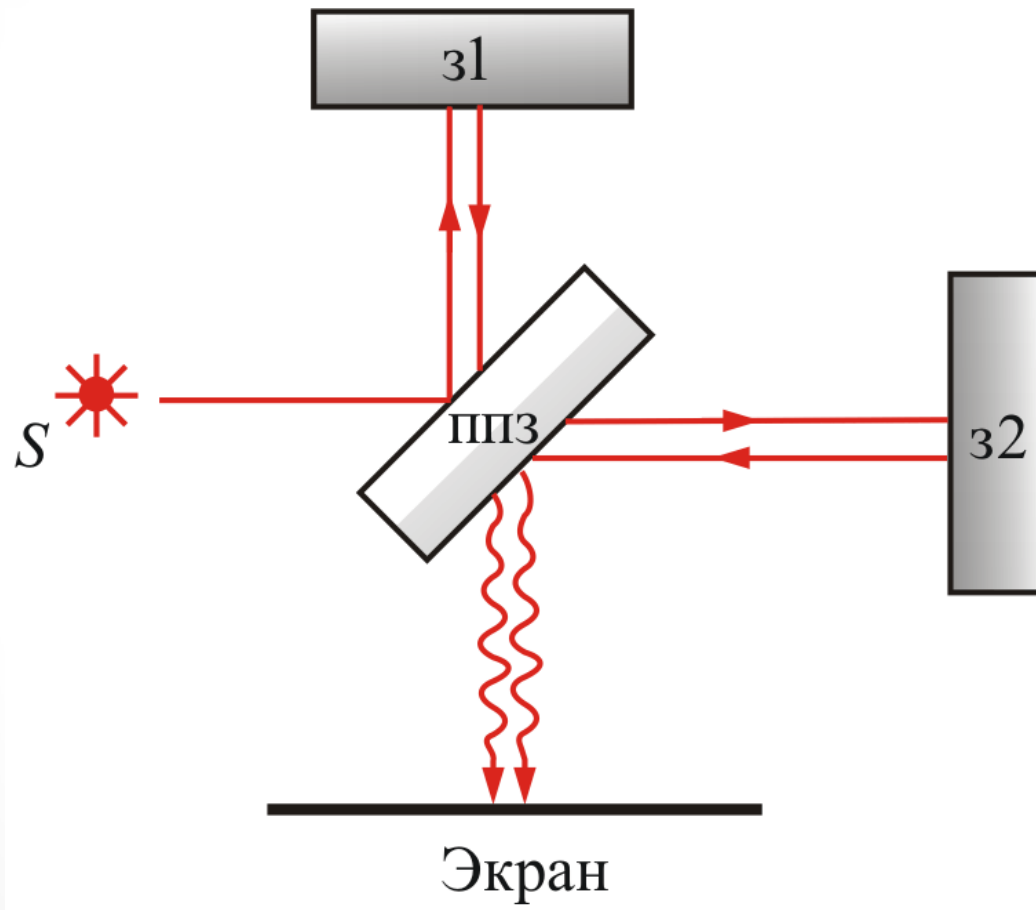


Рисунок 8.3

Прибор состоял из интерферометра с двумя «плечами», расположенными перпендикулярно друг к другу. Вследствие сравнительно большой скорости движения Земли, свет должен был иметь различные скорости по вертикальному и горизонтальному направлениям. Поэтому время, затрачиваемое на прохождение путей: источник S – полупрозрачное зеркало (ппз) – зеркало ($z1$) – ппз и источник – ппз – (зеркало) $z2$ – ппз должно быть различным.

В результате, световые волны, пройдя указанные пути, должны были изменить интерференционную картину на экране. Майкельсон проводил эксперименты в течение семи лет с 1881 г. в Берлине и с 1887 г. в США совместно с химиком, профессором Морли. Точность первых опытов была невелика ± 5 км/с. Однако, опыт дал *отрицательный результат*: сдвиг интерференционной картины обнаружить не удалось. Таким образом, результаты опытов Майкельсона-Морли показали, что величина скорости света постоянна и не зависит от движения источника и наблюдателя.

Таким образом, результаты опытов Майкельсона-Морли показали, что величина скорости света постоянна и не зависит от движения источника и наблюдателя. Эти опыты повторяли и перепроверяли многократно. В конце 60-ых годов Ч. Таунс довел точность измерения до ± 1 м/с. Скорость света осталась неизменной $c = 3 \cdot 10^8$ м · с⁻¹. Независимость скорости света от движения источника и от направления недавно была продемонстрирована с рекордной точностью в экспериментах,

выполненных исследователями из университетов г. Констанц и г. Дюссельдорф (современная версия эксперимента Майкельсона-Морли), в которых установлена лучшая на сегодняшний день точность $1,7 \cdot 10^{-15}$. Эта точность в 3 раза выше достигнутой ранее. Исследовалась стоячая электромагнитная волна в полости кристалла сапфира, охлажденного жидким гелием. Два таких резонатора были ориентированы под прямым углом друг к другу. Вся установка могла вращаться, что позволило установить независимость скорости света от направления.

Было много попыток объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона-Морли. Наиболее известна гипотеза Лоренца о сокращении размеров тел в направлении движения. Он даже вычислил эти сокращения, используя для этого преобразование координат, которые так и называются «сокращения Лоренца-Фитцджеральда».

Дж. Лармор в 1889 г. доказал, что уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразований Лоренца. Очень близок был к созданию теории относительности Анри Пуанкаре. Но Альберт Эйнштейн был первым, кто четко и ясно сформулировал основные идеи теории относительности.

8.2. Принцип относительности Эйнштейна

В 1905 г. в журнале *«Анналы физики»* вышла знаменитая статья А. Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел», в которой была изложена специальная теория относительности (СТО).

Потом было много статей и книг, поясняющих, разъясняющих, интерпретирующих эту теорию.

Принцип относительности Эйнштейна представляет собой фундаментальный физический закон, согласно которому любой процесс протекает одинаково в изолированной материальной системе находящейся в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения. Иначе говоря, законы физики имеют одинаковую форму во всех инерциальных системах отсчета.

В основе СТО лежат **два постулата** выдвинутых Эйнштейном.

1. Все законы природы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета.

Уравнения, выражающие законы природы, *инвариантны* по отношению к любым инерциальным системам отсчета.

Инвариантность – неизменность вида уравнения при переходе из одной системы отсчета в другую (при замене координат и времени одной системы – другими).

2. *Скорость света в пустоте одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от скорости источника и приемника света.*

Все как-то пытались объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона-Морли, а Эйнштейн – постулировал это, как закон.

В первом постулате главное, что время тоже относительно – такой же параметр, как и скорость, импульс, и т.д.

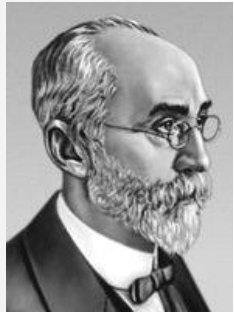
Второй – возводит отрицательный результат опыта Майкельсона-Морли – в ранг закона природы: $c = \text{const}$

Специальная теория относительности представляет физическую теорию, изучающую пространственно-временные закономерности, справедливые для любых физических процессов, когда можно пренебречь действием тяготения. СТО,

опираясь на более совершенные данные, раскрывает новый взгляд на свойства пространства и времени, в рамках которых следует вести описание физических процессов. Эти свойства необходимо учитывать при скоростях движения близких к скорости света.

8.3. Преобразования Лоренца

Формулы преобразования при переходе из одной инерциальной системы в другую с учетом постулатов Эйнштейна предложил Лоренц в 1904 г.



Лоренц Хендрик Антон (1853 – 1928) – нидерландский физик-теоретик, создатель классической электронной теории на основе электромагнитной теории Максвелла-Герца.

Его работы посвящены термодинамике, электродинамике, статической динамике, оптике, теории излучения, атомной физике. На основе электронной теории он объяснил целый ряд физических факторов и явлений, и предсказал новые. Вывел формулу, связывающую диэлектрическую проницаемость с плотностью диэлектрика (формула Лоренца-Лоренца), дал выражение для силы, действующей на движущийся заряд в электромагнитном поле (сила Лоренца), развил теорию дисперсии света.

Для объяснения опыта Майкельсона-Морли выдвинул, независимо от Дж. Фитцджеральда, гипотезу о сокращении размеров тел в направлении их движения (сокращение Лоренца-Фитцджеральда). Разработал электродинамику движущихся тел (преобразования Лоренца). Член многих академий наук, в том числе и АН СССР, лауреат Нобелевской премии.

Также как и в п. 8.1, рассмотрим две инерциальные системы отсчета (неподвижную и подвижную) k и k' . Пусть x, y, z, t координаты и время некоторого события в системе k , а x', y', z', t' координаты и время того же события в k' . Как связаны между собой эти координаты и время? В рамках классической теории при $U \ll c$, эта связь устанавливается преобразованиями Галилея, в основе которых лежат представления об абсолютном пространстве и независимом времени:

$$x = x' + vt'; \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t = t'. \quad (8.3.1)$$

Из этих преобразований следует, что взаимодействия, в том числе и электромагнитные, должны передаваться с бесконечно большой скоростью $c = \infty$ и, скорость движения сигнала в системе k , отличается от скорости в системе k' :
 $\vec{v}_1 = \vec{v}' + \vec{v}$ (рисунок 8.2).

Лоренц установил связь между координатами и временем события в системах отсчета k и k' основываясь на тех экспериментальных фактах, что:

- все инерциальные системы отсчета физически эквивалентны;

- скорость света в вакууме постоянна и конечна, во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от скорости движения источника и наблюдателя.

Таким образом, при больших скоростях движения сравнимых со скоростью света, Лоренц получил

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

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$y = y'$$

$$y' = y$$

$$z = z'$$

$$z' = z$$

(8.3.2)

$$t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

где $\beta = \frac{v}{c}$

Это и есть знаменитые ***преобразования Лоренца***.

Истинный физический смысл этих формул был впервые установлен Эйнштейном в 1905 г. в СТО. В теории относительности время иногда называют четвертым измерением. Точнее говоря, величина ct , имеющая ту же размерность, что и x , y , z ведет себя как четвертая пространственная координата. В теории относительности ct и x проявляют себя с математической точки зрения сходным образом.

Полученные уравнения связывают координаты и время в подвижной k' и неподвижной k системах отсчета. Отличие состоит только в знаке скорости u , что и следовало ожидать, поскольку система k' движется относительно k слева направо со скоростью u , но наблюдатель в системе k' видит систему k , движущуюся относительно него справа налево со скоростью минус u .

При малых скоростях движения $U \ll c$ или при бесконечной скорости распространения взаимодействий ($c = \infty$ теория дальнодействий) преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея (**принцип соответствия**).

8.4. Следствия из преобразований Лоренца

1. Одновременность событий в СТО

По Ньютону, если два события происходят одновременно, то это будет одновременно для любой системы отсчета (время абсолютно). Эйнштейн задумался, как доказать одновременность?

Возьмем два источника света на Земле A и B (рисунок 8.4).

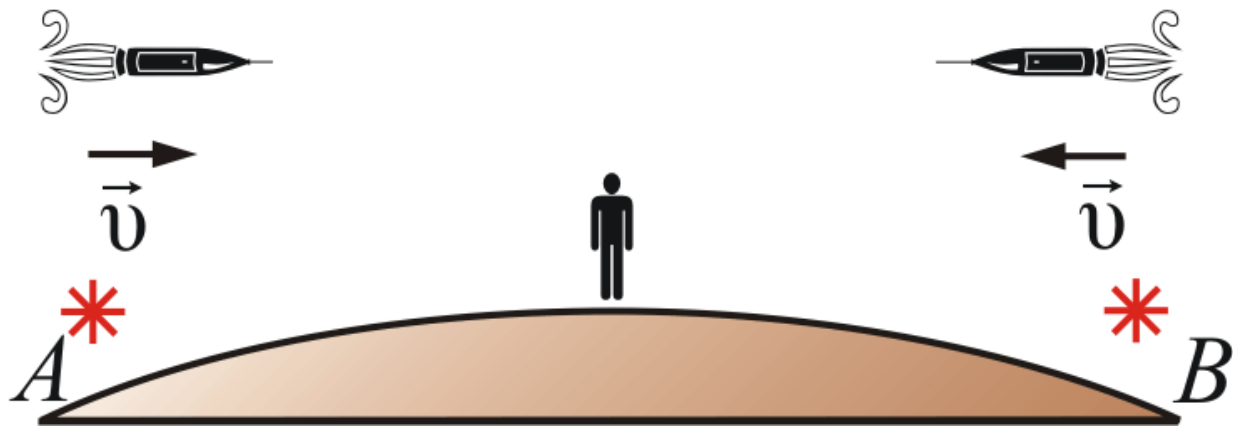


Рисунок 8.4

Если свет встретится на середине AB , то вспышки для человека находящегося на Земле, будут одновременны. Но со стороны пролетающих мимо космонавтов со скоростью u вспышки не будут казаться одновременными, т.к. $c = \text{const}$

Рассмотрим это более подробно.

Пусть в системе k (на Земле) в точках x_1 и x_2 происходят одновременно два события в момент времени $t_1 = t_2 = t$. Будут ли эти события одновременны в k' (в пролетающей мимо ракете)?

Для определения координат в k' воспользуемся преобразованиями Лоренца

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8.4.1)$$

$$x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8.4.2)$$

В соответствии с преобразованиями Лоренца для времени в системе k' получим:

$$t'_1 = \frac{t - \frac{vx_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8.4.3)$$

$$t'_2 = \frac{t - \frac{vx_2}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8.4.4)$$

Если события в системе k происходят одновременно в одном и том же месте $x_1 = x_2$ то и $x'_1 = x'_2$ т.е. и для k' эти события тоже одновременны.

Таким образом, события будут абсолютно **одновременны** в системах k и k' , если они происходят в один и тот же момент времени $t'_2 = t'_1$ в одном и том же месте $x'_2 = x'_1$.

Если же в системе k $x_1 \neq x_2$ то из (8.4.1) и (8.4.2) видно, что и в k' : $x'_1 \neq x'_2$ тогда из (8.4.3) и (8.4.4) видно, что события не одновременны, т.е. $t'_1 \neq t'_2$

Определим интервал времени между событиями в k' :

$$t'_2 - t'_1 = \frac{v(x_1 - x_2)}{c^2 \sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8.4.5)$$

Разница во времени будет зависеть от v и она может отличаться по знаку (ракета подлетает с той или другой стороны).

2. Лоренцево сокращение длины (длина тел в разных системах отсчета)

Рассмотрим рисунок 8.5, на котором изображены две системы координат k и k'

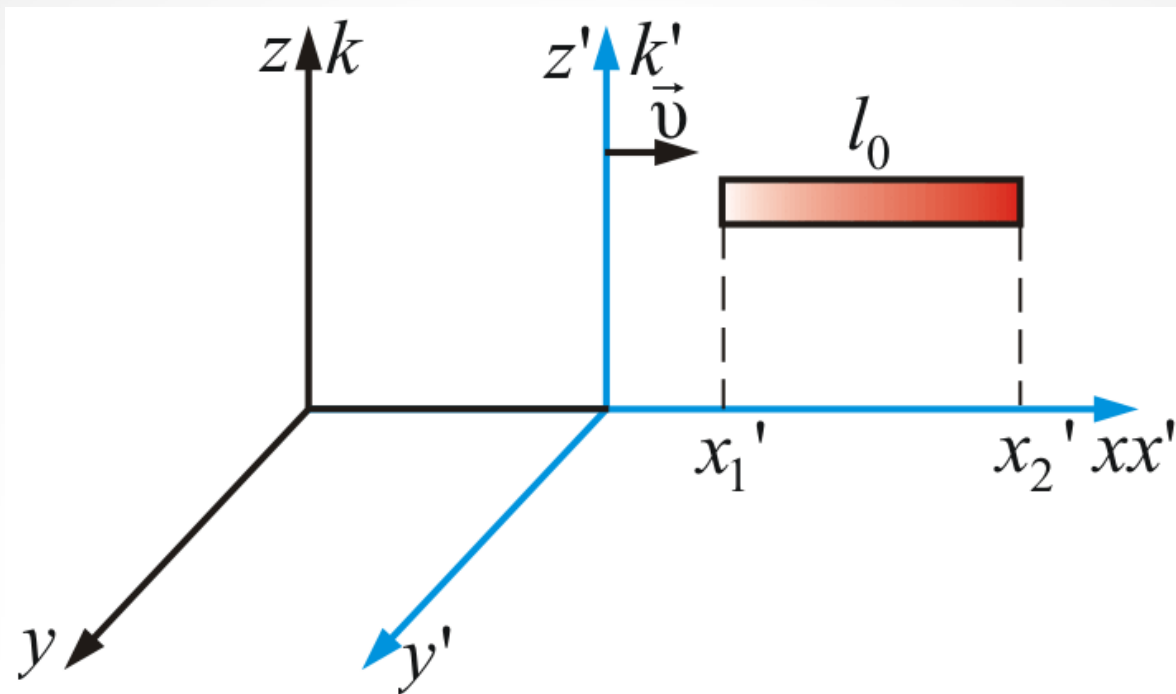


Рисунок 8.5

Пусть $l_0 = x'_2 - x'_1$ – собственная длина тела в системе, относительно которого тело неподвижно (например: в ракете движущейся со скоростью $v \approx c$ мимо неподвижной системы отсчета k (Земля)).

Измерение координат x_1 и x_2 производим одновременно в системе k , т.е. $t_1 = t_2 = t$. Используя преобразования Лоренца, для координат получим:

$$x'_2 - x'_1 = \frac{(x_2 - vt_2) - (x_1 - vt_1)}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \beta^2}};$$

т.е.

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - \beta^2}};$$

или

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (8.4.6)$$

Формула (8.4.7) называется *Лоренцевым сокращением длины*. Собственная длина тела, есть максимальная длина. Длина движущегося тела короче, чем покоящегося. Причем, сокращается только проекция на ось x , т.е. размер тела вдоль направления движения.

3. Замедление времени

(длительность событий в разных системах отсчета)

Пусть вспышка лампы на ракете длится $\tau = t'_2 - t'_1$ где τ – собственное время, измеренное наблюдателем, движущимся вместе с часами. Чему равна длительность вспышки $(t_2 - t_1)$ с точки зрения человека находящегося на Земле, мимо которого пролетает ракета?

Так как $x'_1 = x'_2$, тогда из преобразований Лоренца:

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \text{или}$$

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8.4.7)$$

Из этого уравнения следует, что собственное время – минимально (*движущиеся часы идут медленнее покоящихся*). Таким образом, вспышка на Земле будет казаться длиннее.

Этот вывод имеет множество экспериментальных подтверждений. •

Так, нестабильные элементарные частицы – пионы, рождающиеся в верхних слоях атмосферы, на высоте 20 – 30 км, при воздействии на нее космических лучей, имеют собственное время жизни $\tau \sim 2 \cdot 10^{-6}$ с. За это время они могут пройти путь $S = c \cdot \tau = 600$ м. Но, в результате того, что они двигаются с очень большими скоростями, сравнимыми со скоростью света, их время жизни увеличивается и они до своего распада способны достигать поверхности Земли. Отсюда следует вывод, что у движущихся пионов секунды «длиннее» земных секунд.

В 60 – 70 гг. замедление времени наблюдалось не только с помощью нестабильных микрочастиц, но и проводились прямые измерения с использованием высокоточных часов, основанных на эффекте Мессбауэра. Двое таких часов показывают одно и то же время с точностью до 10^{-16} с.

В 1971 г. Хафель и Китинг осуществили прямое измерение замедления времени, отправив два экземпляра атомных часов в кругосветное путешествие на реактивном самолете. Потом их показания сравнили с показаниями таких же часов, оставленных на Земле, в лаборатории ВМС США. Время запаздывания составило $273 \cdot 10^{-9}$ с, что в пределах ошибок согласуется с теорией.

Это следствие из преобразований Лоренца объясняет известный всем «парадокс близнецов».

4. Сложение скоростей в релятивистской механике

Пусть тело внутри космического корабля движется со скоростью $v' = 200000$ км/с и сам корабль движется с такой же скоростью $v = 200000$ км/с. Чему равна скорость тела относительно Земли u ? Используем для рассмотрения примера рисунок 8.1.

Классическая механика ответит на этот вопрос просто: в соответствии с преобразованиями Галилея скорость тела относительно Земли будет:

$$v_x = v' + v = 4 \cdot 10^5 \text{ км/с},$$

что, конечно же противоречит положению СТО о том, что **скорость света является предельной скоростью переноса информации, вещества и взаимодействий: $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.**

Оценим скорость тела, используя преобразования Лоренца.

Внутри корабля перемещение dx' за время dt' равно $dx' = v' dt'$. Найдем dx и dt с точки зрения наблюдателя на Земле, исходя из преобразований Лоренца:

$$dx = \frac{v' t' + v dt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad dy = dy'; \quad dz = dz'; \quad (8.4.8)$$

$$dt = \frac{dt' + \frac{v v' dt'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (8.4.9)$$

Так как $v_x = \frac{dx}{dt}$ то:

$$v_x = \frac{v' dt' + v dt'}{dt' + \frac{v v' dt'}{c^2}};$$

$$v = \frac{v' + v_0}{1 + \frac{v v'}{c^2}}. \quad (8.4.10)$$

Эта формула выражает правило сложения скоростей в релятивистской кинематике.

Подсчитаем скорость тела в нашем примере в соответствии полученной формулой:

$$v_x = \frac{2 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^5}{1 + \frac{4 \cdot 10^{10}}{9 \cdot 10^{10}}} = 2,8 \cdot 10^5 \text{ км/с.}$$

Полученный результат не противоречит положению СТО о предельности скорости света.

При медленных движениях, когда $v \ll c$ получаем нерелятивистские формулы, соответствующие преобразованиям Галилея.

Если движение происходит со скоростью света, то

$$v = \frac{c + c}{1 + \frac{c^2}{c^2}} = c. \quad (8.4.11)$$

Полученные формулы сложения скоростей запрещают движение со скоростью больше скорости света. Уравнения Лоренца преобразуют время и пространство так, что свет распространяется с одинаковой скоростью с точки зрения всех наблюдателей, независимо, двигаются они или покоятся.

8.5. Релятивистская механика

Релятивистское выражение для импульса

Найдем такое выражение для импульса, чтобы закон сохранения импульса был инвариантен к преобразованиям Лоренца при любых скоростях (как мы уже говорили, уравнения Ньютона не инвариантны к преобразованиям Лоренца и закон сохранения импульса в k выполняется, а в k' – нет).

Ньютоновское выражение для импульса

$$\vec{p} = m\vec{v} = m \frac{d\vec{r}}{dt} \quad \text{или} \quad p = m \frac{dx}{dt}$$

Вот это выражение надо сделать инвариантным. Это возможно если в него будут входить инвариантные величины. В выражении

$$p = m \frac{dx}{dt}, \quad (8.5.1)$$

m – постоянная величина – масса частицы в системе k (собственная масса частицы), инвариантная величина,

dt – интервал времени по часам неподвижного наблюдателя. Если заменить dt на $d\tau = dt \sqrt{1 - \beta^2}$ – собственное время частицы, тоже инвариантная величина, то получим инвариантное

выражение для импульса $p = m \frac{dx}{d\tau}$

Преобразуем это выражение с учетом того,

что $dt = \frac{d\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}}$

$$p = m \frac{dx / dt}{\sqrt{1 - \beta^2}};$$

Или в векторной форме

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8.5.2)$$

Это и есть **релятивистское выражение для импульса.**

Из (8.5.2) следует, что *никакое тело* не может двигаться со скоростью большей или даже *равной скорости света* (при знаменателе стремится к нулю, тогда $v \rightarrow c$, что невозможно в силу закона сохранения импульса, $p \rightarrow \infty$).

Релятивистское выражение для энергии

По определению \vec{p} – импульс релятивистской частицы, а скорость изменения импульса

равна силе, действующей на частицу $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

Работа силы по перемещению частицы идет на увеличение энергии частицы

$$dA = (\vec{F}, d\vec{r}) = \left(\frac{d\vec{p}}{dt}, d\vec{r} \right) = (d\vec{p}, \vec{v}) = dE.$$

После интегрирования этого выражения получим **релятивистское выражение для энергии** частицы:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8.5.3)$$

где E – **полная энергия**.

При $\mathcal{V} = 0$ в системе координат, где частица покоится, выражение (8.5.3) преобразуется:

$$E_0 = mc^2 \quad (8.5.4)$$

– **энергия покоя** частицы.

Выражение (8.5.4) является инвариантным относительно преобразований Лоренца.

Именно утверждение о том, что в покоящейся массе (материи) огромные запасы энергии, является главным практическим следствием СТО E_0 – *внутренняя энергия частицы (учитывающая все)*.

Полная энергия в теории относительности складывается из энергии покоя и кинетической энергии (K). Тогда

$$K = E - E_0 = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - mc^2 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$$

Справедливость теории проверяется принципом соответствия: при $v \ll c$

должно быть $K = \frac{mv^2}{2}$

Получим еще одно очень важное соотношение, связывающее полную энергию с импульсом частицы.

Из уравнения (8.5.2) получим

$$v^2 = \frac{p^2}{m^2 + \frac{p^2}{c^2}} = \frac{p^2 c^2}{m^2 c^2 + p^2}.$$

Подставив в (8.5.3) получим:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{p^2 c^2}{(m^2 c^2 + p^2) c^2}}}$$

отсюда

$$E = c \sqrt{m^2 c^2 + p^2} \quad (8.5.5)$$

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

Таким образом, получили инвариантное выражение, связывающее энергию и импульс. *Измеренные в разных системах координат E и p будут разными, но их разность будет одинакова в любой системе координат.*

Изменяются при переходе из одной системы координат в другую лишь t , E , \vec{p} , \vec{r} а m величина инвариантная. Скорость u – имеет тот же смысл что и u Ньютона.

8.6. Взаимосвязь массы и энергии покоя

Масса и энергия покоя связаны соотношением:

$$E_0 = mc^2 \quad (8.6.1)$$

из которого вытекает, что всякое изменение массы Δm сопровождается изменением энергии покоя ΔE_0 .

$$\Delta E_0 = c^2 \Delta m$$

Это утверждение носит название закона *взаимосвязи массы и энергии* покоя и стало символом современной физики.

Взаимосвязь между массой и энергией оценивалась А. Эйнштейном как самый значительный вывод специальной теории относительности. По его выражению, масса должна рассматриваться как «сосредоточение колоссального количества энергии». При этом масса в теории относительности не является более сохраняющейся величиной, а зависит от выбора системы отсчета и характера взаимодействия между частицами.

Определим энергию, содержащуюся в 1 г. любого вещества, и сравним ее с химической энергией, равной $2,9 \cdot 10^4$ Дж получаемой при сгорании 1 г. угля. Согласно уравнению •

Эйнштейна $E = mc^2$ имеем

$$E_0 = (10^{-3} \text{ кг})(3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ Дж.}$$

Таким образом, собственная энергия в $3,1 \cdot 10^8$ раз превышает химическую энергию.

Из этого примера видно, что если высвобождается лишь одна тысячная доля собственной энергии, то и это количество в миллионы раз больше того, что могут дать обычные источники энергии.

Суммарная масса взаимодействующих частиц не сохраняется.

Пример: пусть две одинаковые по массе частицы m движутся с одинаковыми по модулю скоростями навстречу друг другу и абсолютно не упруго столкнутся.

До соударения полная энергия каждой

частицы E равна:
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Полная энергия образовавшейся частицы Mc^2 (эта новая частица имеет скорость $v = 0$).

Из закона сохранения энергии

$$\frac{2mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = Mc^2$$

откуда M равно:

$$M = \frac{2m}{\sqrt{1-\beta^2}} > 2m \quad (8.6.2)$$

Таким образом, сумма масс исходных частиц $2m$, меньше массы образовавшейся частицы M ! В этом примере, кинетическая энергия частиц превратилась в эквивалентное количество энергии покоя, а это привело к возрастанию массы

$$\Delta M = \frac{\Delta K}{c^2}$$

(это при отсутствии выделения энергии при соударении частиц).

Выражение «*масса покоя*» можно употребить как синоним «*энергия покоя*». Пусть система (ядро) состоит из N частиц с массами $m_1, m_2 \dots m_i$. Ядро не будет распадаться на отдельные частицы, если они связаны друг с другом. Эту связь можно охарактеризовать энергией связи $E_{\text{св}}$.

Энергия связи – энергия которую нужно затратить, чтобы разорвать связь между частицами и разнести их на расстояние, при котором взаимодействием частиц друг с другом можно пренебречь.

$$E_{\text{св}} = c^2 \sum_{i=1}^n m_i - Mc^2 = c^2 \Delta M, \quad (8.6.3)$$

где $\Delta M = (m_1 + m_2 + \dots + m_i) - M$; ΔM – дефект массы.

Видно, что $E_{\text{св}}$ будет положительна, если

$$M < \sum_{i=1}^n m_i$$

Это и наблюдается на опыте.

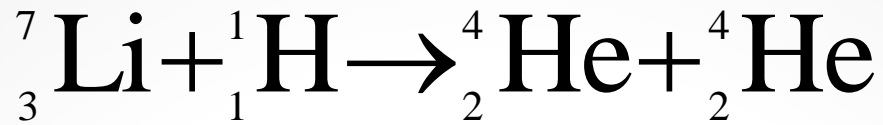
При слиянии частиц энергия связи высвобождается (часто в виде электромагнитного излучения).

Например, ядро U238 имеет энергию связи

$$E_{\text{св}} = 2,9 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \approx 1,8 \cdot 10^9 \text{ эВ} = 1,8 \text{ ГэВ.}$$

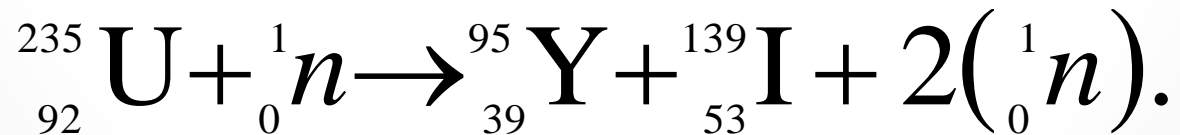
Ядерные реакции

Ядерной реакцией называется процесс взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или другим ядром, приводящий к преобразованию исходного ядра. Например:



Это реакция взаимодействия протона с ядром лития. Реакция протекает с выделением энергии.

В ядерной энергетике большой практический интерес имеют реакции с участием нейтронов, в частности, реакция деления ядер ${}^{235}_{92}\text{U}$



Реакция протекает при захвате ядрами ${}_{92}^{235}\text{U}$ медленных нейтронов. Ядра иттрия и йода – это осколки деления. Ими могут быть и другие ядра. Характерно, что в каждом акте деления возникает 2 – 3 нейтрона, которые могут вызвать деление других ядер урана, причем, также с испусканием нейтронов. В результате количество делящихся ядер стремительно нарастает. Возникает *цепная ядерная реакция* с выделением большого количества энергии. Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления атомных ядер, называется *ядерным реактором*.

Его основные элементы: ядерное топливо, замедлитель нейтронов, теплоноситель для отвода тепла и устройство для регулирования скорости реакции.

Термоядерные реакции

Термоядерные реакции – это реакции синтеза легких ядер, протекающие при очень высоких температурах. Высокие температуры необходимы для сообщения ядрам энергии, достаточной для того, чтобы сблизиться до расстояния, сравнимого с радиусом действия ядерных сил (10–15 м).

Энергия, выделяющаяся в процессе термоядерных реакций в расчете на один нуклон, существенно превышает удельную энергию, выделяющуюся в процессе реакций деления тяжелых ядер. Так, при синтезе тяжелого водорода – дейтерия, со сверхтяжелым изотопом водорода – тритием, выделяется энергия около 3,5 МэВ на один нуклон, в то время как в процессе деления ядер урана, выделяется примерно 0,85 МэВ энергии на один нуклон.

Термоядерная реакция синтеза дейтерия с тритием:



наиболее перспективна в плане получения практически неисчерпаемого источника энергии. Однако, осуществление такой реакции в управляемом режиме, равно как и других реакций синтеза, в настоящее время является пока проблемной задачей, хотя успехи в этом направлении несомненны. В настоящее время уже получена плазма, температура которой порядка $2 \cdot 10^8$ К, а время удержания не менее 2 с при выделяемой мощности до 2 МВт.

Есть надежда, что термоядерный реактор практического применения будет создан уже в первой четверти XXI века.

Выделяется в виде энергии не более 0,1 % массы вещества. Полностью энергия покоя выделяется только при **аннигиляции**, в виде электромагнитного излучения, как например, при аннигиляции электрона и позитрона (рисунок 8.6).

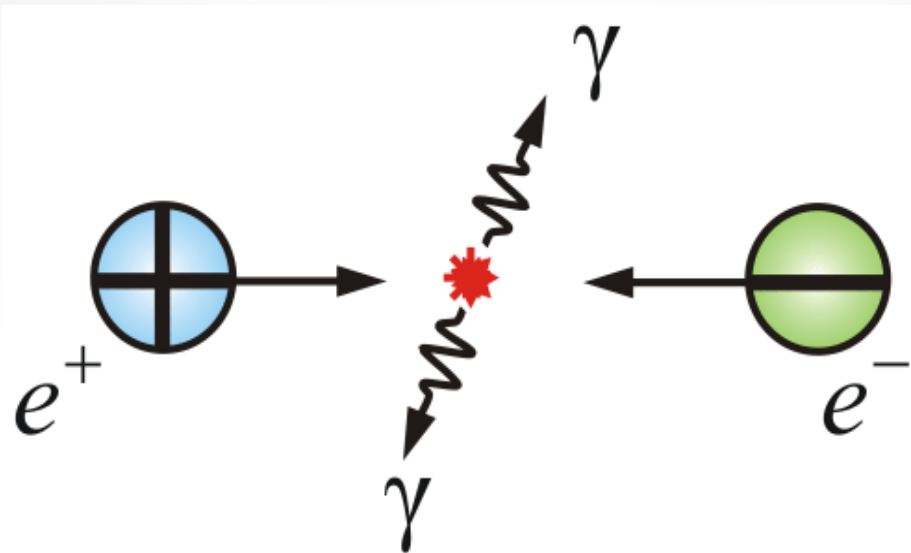


Рисунок 8.6