

Лекция № 8

**ЭЛЕМЕНТЫ
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ
МЕХАНИКИ**

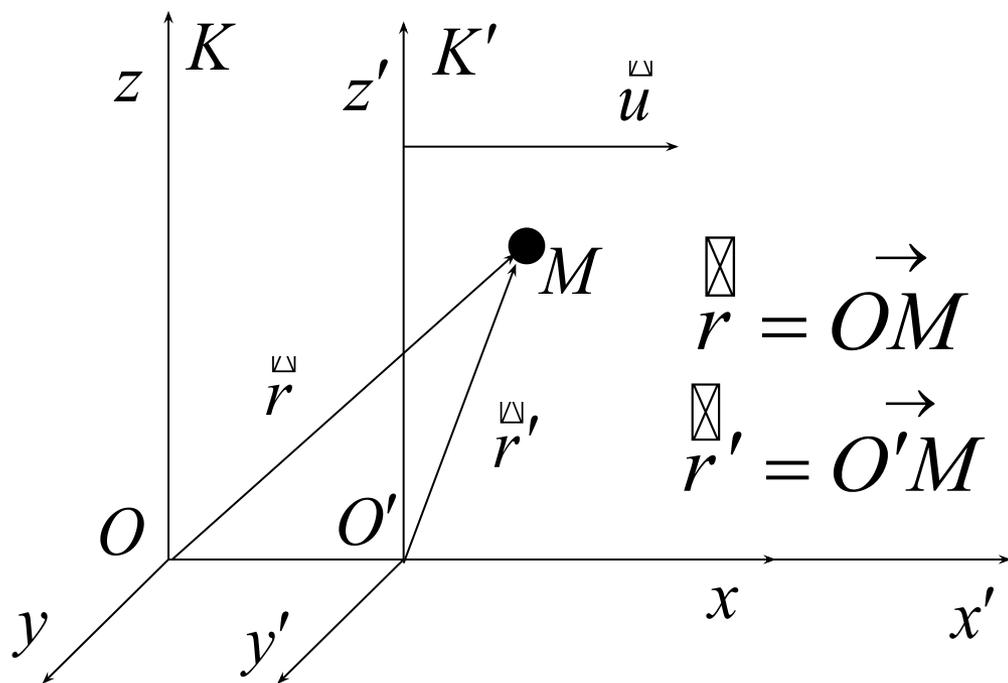
Преобразования Галилея

В ИСО время однородно, а пространство однородно и изотропно.

K – условно «неподвижная» ИСО, K' -СО движется относительно K -СО поступательно со скоростью $\vec{u} = \text{const}$

В системе K'

$$\vec{r}' = \vec{r}'(x, y, z, t)$$



$$\vec{r} = \vec{OM}$$

$$\vec{r}' = \vec{O'M}$$

За время t начало координат K' -СО переместится из O в O'

$$\vec{OO'} = \vec{u}t = \vec{u}t',$$

где t – время, измеренное по часам «неподвижного» наблюдателя; t' – по часам «движущегося».

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{OO'}$$

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{u}t', \quad t = t' \quad (8.1)$$

Преобразования Галилея.

(8.1) в проекциях на оси координат:

$$x = x' + ut', \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t' \quad (8.2)$$

В нерелятивистской ($u \ll c$) кинематике время считается абсолютным, а поэтому не преобразуется.

В основе вывода (8.2) лежит предположение об абсолютности длин промежутков времени. Формулы (8.2) справедливы лишь при относительной скорости системы $u \ll c$.

Классический закон сложения скоростей

Дифференцируем (8.1) по t

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt} + \vec{u}$$

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}, \quad (8.3)$$

где \vec{v} – скорость МТ относительно K -СО,
 \vec{v}' – скорость МТ относительно K' -СО.

Инвариантность уравнений механики относительно преобразований Галилея

Дифференцируем (8.3) при $\overset{\vee}{u} = \text{const}$

$$\frac{d\overset{\vee}{v}}{dt} = \frac{d\overset{\vee}{v}'}{dt} = \frac{d\overset{\vee}{v}'}{dt'},$$

$$\overset{\vee}{a} = \overset{\vee}{a'}, \quad (8.4)$$

где $\overset{\vee}{a}$ – ускорение МТ относительно K -СО,
 $\overset{\vee}{a}'$ – ускорение МТ относительно K' -СО.

Ускорение в обеих СО одно и то же, т.е. оно инвариантно (неизменно) относительно преобразований Галилея.

Согласно классической механике, масса m не зависит от выбора СО.

Если 2-ой закон Ньютона в «неподвижной» системе

$$m \overset{\square}{a} = \overset{\square}{F},$$

то и в «движущейся» системе

$$\overset{\square}{F}' = m \overset{\square}{a}' = m \overset{\square}{a}, \quad \overset{\square}{F} = \overset{\square}{F}'$$

Уравнения, остающиеся неизменными при переходе от одной СО к другой, называют *инвариантными*.

Упругие силы и силы тяготения, определяемые конфигурацией тел, т.е. расстоянием между точками, не изменяются при переходе от K к K' -СО и наоборот.

Действительно, согласно преобразованиям Галилея, для любых 2-х точек (при данном t):

$$x_2 - x_1 = x'_2 - x'_1,$$

$$y_2 - y_1 = y'_2 - y'_1, \quad z_2 - z_1 = z'_2 - z'_1$$

Это справедливо и для *сил трения*, зависящих от относительной скорости тел, между которыми они действуют. В преобразованиях Галилея относительная скорость (разность скоростей двух тел) не изменяется:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}'_1 + \vec{u}, \quad \vec{v}_2 = \vec{v}'_2 + \vec{u}, \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \vec{v}_2 - \vec{v}_1 = (\vec{v}'_2 + \vec{u}) - (\vec{v}'_1 + \vec{u}) = \vec{v}'_2 - \vec{v}'_1$$

Т.о., уравнения движения запишутся одинаково относительно обеих СО K к K' .

Принцип относительности Галилея:

уравнения механики Ньютона инвариантны относительно преобразований Галилея.

Физическое содержание составляет *относительность механического движения* (относительность скорости, траектории и т.д.) и *одинаковость (безотносительность) законов механики в разных ИСО.*

Таким образом (т.о.), *равномерное и прямолинейное движение материальной системы как целого не влияет на ход механических процессов, происходящих внутри системы.*

Математически *Галилеев* *принцип*
относительности *выражает*
инвариантность *уравнений* *механики*
относительно преобразований Галилея.

Т.о., принцип относительности Галилея
фактически устанавливает физическое и
математическое равноправие всех ИСО.

Специальная теория относительности (СТО)

К моменту возникновения теории относительности (начало XX века), теоретическая физика состояла не только из механики.

В XIX веке создана электродинамика.

Законы электродинамики оказались не инвариантны относительно преобразований Галилея. Например: скорость света в пустоте, вычисленная из уравнений электродинамики, является постоянной величиной.

С классической т. зрения, такой результат может относиться только к покоящейся СО, т.к. относительно СО, движущейся со скоростью u , скорость света будет $c - u$, если свет «догоняет» систему, и $c + u$, если свет движется ей навстречу. Можно обнаружить абсолютную скорость движения СО (некоторой движущейся среды – «эфира»).

⇒, должна существовать привилегированная ИСО, в к-рой «эфир» покоится, а законы электродинамики не нарушаются.

Однако специально поставленные опыты по измерению скорости Земли относительно «эфира» потерпели неудачу.

Оказалось, что движение СО (Земли) не нарушает законов электродинамики вопреки тому, что следовало из классической теории.

Всестороннее решение проблемы относительности в механике и электродинамике дано в 1905г. Эйнштейном.

*В результате возникла «новая» теория (главная роль в её создании принадлежит Эйнштейну) – **специальная теория относительности** (СТО), которая рассматривает явления только в ИСО.*

Явления в неинерциальных СО рассматривает **общая теория относительности.**

Постулаты Эйнштейна

Лежат в основе СТО:

1. **Постулат относительности:** *при одинаковых условиях, реализованных по отдельности в двух СО – некоторой ИСО K и ИСО K' , движущейся равномерно и прямолинейно относительно K -системы, – любые физические процессы протекают в этих системах одинаково.*

2. **Постулат инвариантности скорости света:** *скорость света c в вакууме одинакова во всех ИСО и не зависит от движения источника и приемника света.*

Принцип относительности Эйнштейна, как и принцип относительности Галилея, утверждает равноправие ИСО, но для более широкого круга явлений.

Согласно этому принципу все законы физики (не только механики, но и электродинамики и т.д.) одинаковы во всех ИСО. \Leftrightarrow

\Leftarrow Равномерное и прямолинейное движение системы материальных тел как целого со скоростями не больше предельной скорости распространения взаимодействия не влияет на закономерности протекания всех физических процессов.

Преобразования Лоренца

Согласно СТО, формулы преобразования (8.1) должны быть заменены новыми, которые обеспечат инвариантность всех физических законов.

Чтобы установить новые формулы преобразования, необходимо *рассмотреть* четырехмерное пространство, в котором четвертой (равноправной) координатой является время.

Т.о., реальное физическое пространство – время в СТО представляется (отображается) четырехмерным пространством.

Новые формулы преобразования, связывающие множество ИСО и так же, как и преобразования Галилея, отражающие однородность пространства и времени, назвали преобразованиями Лоренца.

В основе преобразований Лоренца – постулат о постоянстве скорости света.

Преобразования Лоренца – связь между координатами и временем одного и того же события в двух ИСО K' и K

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z,$$

(8.5а)

$$t' = \frac{t - (ux/c^2)}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}$$

(8.5а) получены Лоренцем в 1904 г. При $u \ll c$ эти формулы переходят в формулы преобразования Галилея.

Из 4-ой формулы (8.5а) следует: *одновременные, но происходящие в разных точках пространства события в K-системе не являются одновременными в K'-системе.*

Если $x_1 \neq x_2$, то для одного и того же момента времени t :

$$t'_1 = \frac{t - (ux_1/c^2)}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}, \quad t'_2 = \frac{t - (ux_2/c^2)}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}$$

т.е. $t'_1 \neq t'_2$.

Отметим, что в момент совмещения осей систем K и K' только базовые часы, находящиеся в точке, принятой за начало системы координат, показывают одинаковое время, а именно $t = t' = 0$ при $x_0 = x'_0 = 0$. Показания часов, находящихся в любой другой точке неодинаковы.

Разрешим (8.5а) относительно координат x , y , z , t (переход от K' -системы к K -системе):

$$\begin{aligned} x &= \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}, \\ y &= y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + (ux'/c^2)}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \end{aligned} \quad (8.5б)$$

Литература:

- Иродов И.Е. Механика. Основные законы. — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000