Лекция 5.

Неинерциальные системы отсчета. Преобразования Галилея. Преобразования Лоренца.

Неинерциальная система отсчета

Неинерциальной называется такая система отсчета, которая движется ускоренно относительно инерциальной системы.

Законы Ньютона выполняются только в инерциальных системах отсчета.

Классическая механика постулирует два принципа:

1. **Время абсолютно**, то есть промежутки времени между двумя любыми событиями одинаковы во всех произвольно движущихся системах отсчета.

2. **Пространство абсолютно**, то есть расстояние между любыми двумя материальными точками одинаково во всех произвольно движущихся системах отсчета.

Эти принципы позволяют записать уравнение движения материальной точки в любой неинерциальной системе отсчета.

Силы инерции

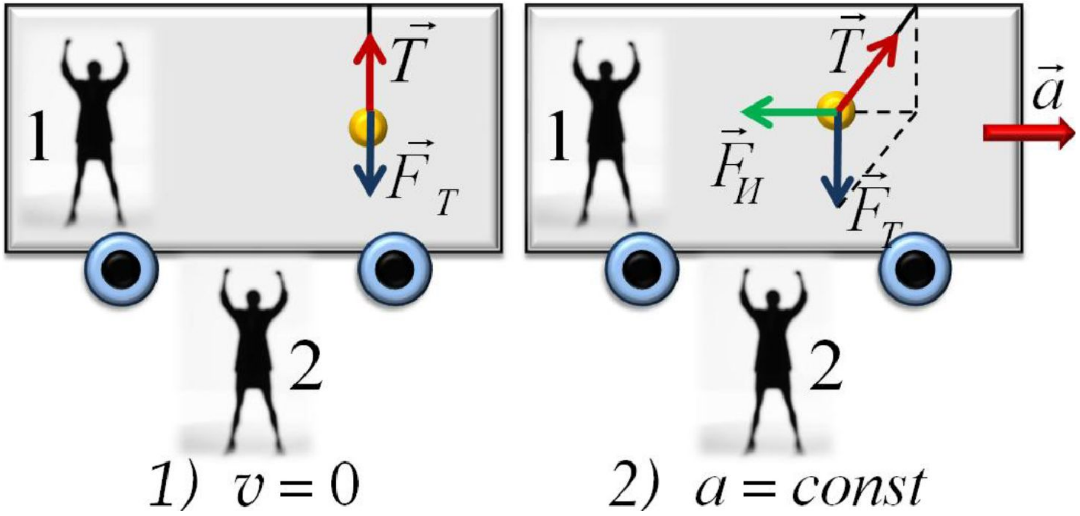
Если система отсчета движется с ускорением, то есть является неинерциальной, то законы Ньютона в ней применять нельзя.

Однако при ускоренном движении системы отсчета достаточно ввести понятие **силы инерции**. Тогда законы Ньютона будут выполняться и в неинерциальных системах.

<u>Пример 1</u>: движение автомобиля с ускорением a

$$\boxed{\vec{F}_и = -m\vec{a}}$$

<u>Пример 2</u>: груз в вагоне



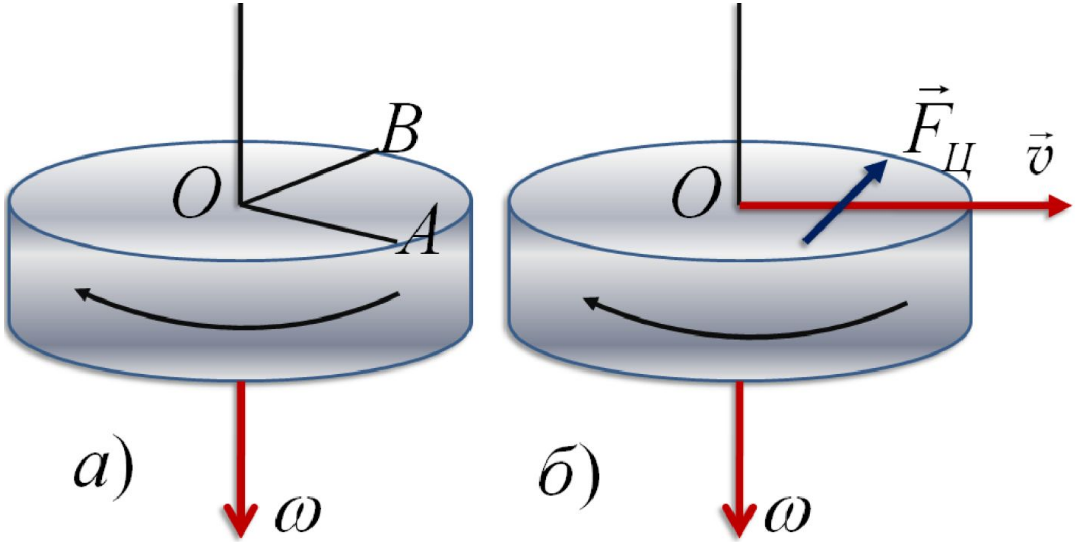
Сила инерции является не результатом взаимодействия тел, а результатом перехода в неинерциальную систему отсчета

Центробежная сила

Сила инерции, действующая во вращающейся системе отсчета, называется **центробежной**. Эта сила действует в направлении, противоположном нормальному ускорению, то есть в направлении от центра вращения.

$$\boxed{F_{Ц} = ma = m\omega^2 R}$$

Рассмотрим силы инерции, действующие на тело, *движущееся* во вращающейся системе отсчета.



Скорость шарика относительно диска при вращении меняет направление - имеется сила инерции, перпендикулярная скорости (**кориолисова сила**).

Пусть

$\vec{\upsilon}\,'$ - скорость тела во вращающейся системе отсчета,

$\vec{\upsilon}$ - скорость тела в неподвижной системе отсчета,

ω - угловая скорость вращения системы.

Тогда сила, действующая на тело в неподвижной системе:

$$\vec{F}_{инерции} = ma_n = m \cdot \frac{\upsilon^2}{R} = m \cdot \frac{\upsilon' + \omega R \;\;^{2}}{R} =$$

$$= m \cdot \frac{\upsilon'^2 + 2\upsilon'\omega R + \omega^2 R^2}{R} = m \cdot \frac{\upsilon'^2}{R} + 2m \cdot \upsilon' \cdot \omega + m \cdot \omega^2 R$$

$$F = m \cdot \frac{\upsilon'^2}{R}$$

сила во вращающейся системе

$$F_к = 2m \cdot \upsilon' \cdot \omega$$

сила Кориолиса

$$F_ц = m \cdot \omega^2 R$$

центробежная сила

Резюме:

Силы инерции вызываются не взаимодействием тел, а ускоренным движением системы отсчета. В инерциальных системах отсчета силы инерции отсутствуют.

Свойства сил инерции:

1. Силы инерции неинвариантны относительно перехода от одной ускоренной системы отсчета к другой.

2. Силы инерции не подчиняются третьему закону Ньютона (равенству действия и противодействия).

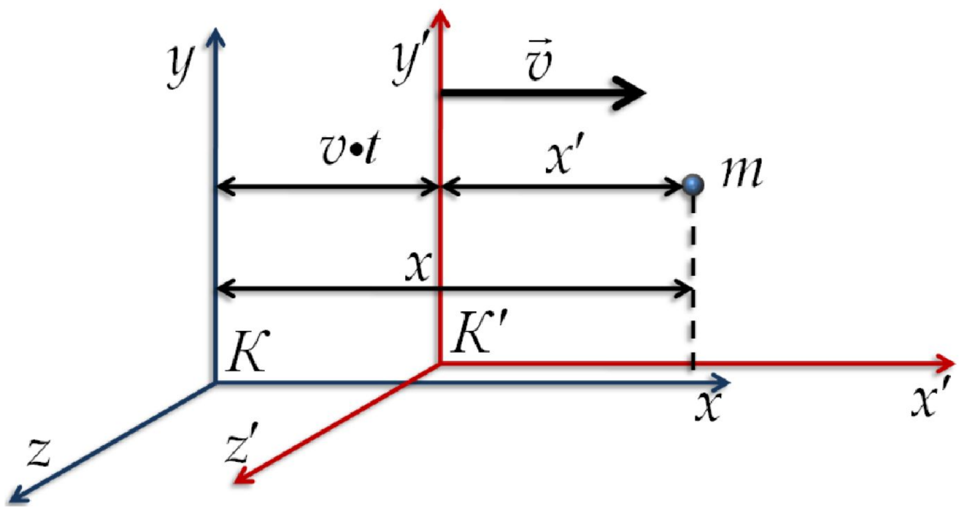
3. Силы инерции всегда являются внешними по отношению к любой точке, находящейся в неинерциальной системе отсчета, следовательно, здесь нет замкнутых систем, и не выполняются законы сохранения.

4. Силы инерции пропорциональны массе материальной точки.

Движение точки под действием сил инерции аналогично движению во внешних силовых полях, в том числе *в гравитационном поле*.

Преобразования Галилея

Преобразование Галилея - уравнения, связывающие координаты и время некоторого события в двух инерциальных системах отсчета.



Принцип относительности Галилея: никакими механическими опытами нельзя установить, покоится ли данная система отсчета или движется равномерно и прямолинейно.

$$x = x' + \upsilon t$$

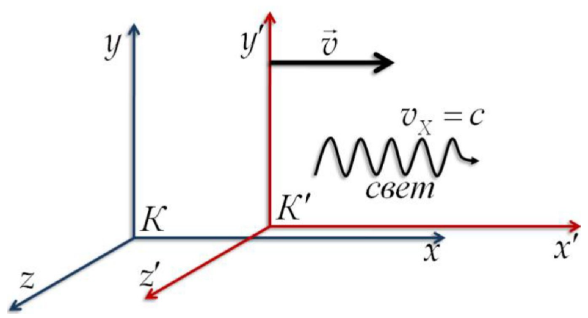
$$y = y' \qquad z = z' \qquad t = t'$$

формулы преобразования Галилея

двойное дифференцирование

Следствия преобразования Галилея

1) Ход времени одинаков в обеих системах отсчета (абсолютный характер времени.
2) Равенство масс в обеих системах отсчета (абсолютный характер массы).
3) Равенство ускорений масс в обеих системах отсчета (абсолютный характер ускорения).
4) Равенство сил взаимодействия материальных точек в инерциальных системах отсчета (инвариантность сил относительно преобразований Галилея).



Неудовлетворительность механики Ньютона при больших скоростях: Скорость света оказалась одинаковой в разных системах отсчета! (опыты Майкельсона)

Постулаты специальной теории относительности (СТО)

1) *Принцип относительности*.

2) *Принцип постоянства скорости света*.

Преобразования Лоренца

В отличие от преобразований Галилея преобразования Лоренца не противоречат постулатам СТО, а именно, гарантируют постоянство скорости света во всех инерциальных системах.

$$\beta = \frac{\upsilon}{c}$$

$$x = \frac{x' + \upsilon t'}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

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

$$x' = \frac{x - \upsilon t}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

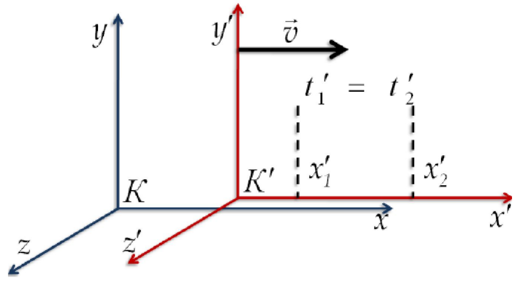
$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

Следствия из преобразований Лоренца

1. *Относительность одновременности*



$$t_1 = \gamma\left(t_1' + \frac{\upsilon}{c^2}x_1'\right) \qquad t_2 = \gamma\left(t_2' + \frac{\upsilon}{c^2}x_2'\right)$$

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

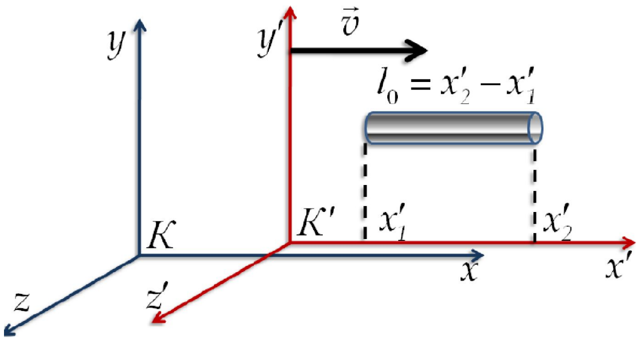
Одновременные события в одной системе отсчета, не являются одновременными в другой.

2. *Относительность промежутков времени*

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma \Delta t'$$

Движущиеся часы идут медленнее неподвижных.

3. *Относительность длин и расстояний*



$$x_1' = \frac{x_1 - \upsilon t}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad x_2' = \frac{x_2 - \upsilon t}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} = \frac{l_0}{\gamma}$$

Размеры движущегося тела меньше размеров неподвижного.

4. *Преобразование скоростей*

$$v_x = \frac{v_x' + u}{1+\frac{uv_x'}{c^2}} \qquad v_y = \frac{v_y'\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}{1+\frac{uv_x'}{c^2}} \qquad v_z = \frac{v_z'\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}{1+\frac{uv_x'}{c^2}}$$

Релятивистский закон сложения скоростей: сумма двух скоростей, меньших или равных скорости света, не превышает скорость света.

Релятивистская динамика

1) Релятивистский импульс.

$$\vec{p} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m_0\vec{v}$$

2) Уравнение движения (второй закон Ньютона)

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

3) Релятивистские выражения для энергии

полная энергия $E = mc^2$

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m_0 c^2$$

кинетическая энергия $E_к = mc^2 - m_0 c^2$

энергия покоя $E_0 = m_0 c^2$

4) Релятивистский инвариант

$$E = mc^2 \qquad \vec{p} = m\vec{v} \qquad p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow p^2 = \frac{m_0^2 v^2}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

$$p^2 = \frac{p^2 E^2}{(p^2 + m_0^2 c^2)c^2} \Rightarrow E = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$$

Таким образом, **энергия и импульс в релятивистской механике не сохраняются**, однако сохраняет свое значение релятивистский инвариант

$$\boxed{\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m_0^2 c^2 = inv}$$