

## Опорный конспект

### Принцип относительности Галилея

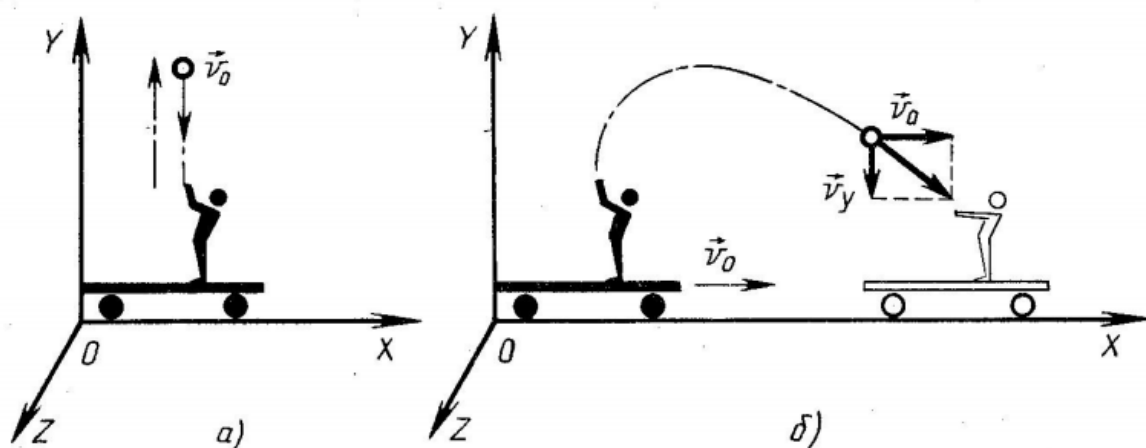
Инерциальные системы отсчета (ИСО) — системы отсчета, в которых выполняется первый закон Ньютона — закон инерции. Системы, которые вращаются или ускоряются, неинерциальные. Землю нельзя считать вполне ИСО: она вращается, но для большинства наших целей СО, связанные с Землей, в достаточно хорошем приближении можно принять за инерциальные. Система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно ИСО, также инерциальна.

Г. Галилей и И. Ньютон глубоко осознавали то, что мы сегодня называем *принципом относительности*, согласно которому механические законы физики должны быть одинаковыми во всех ИСО при одинаковых начальных условиях. Из этого следует: *ни одна ИСО ничем не отличается от другой СО*. Все ИСО эквивалентны с точки зрения механических явлений.

Принцип относительности Галилея исходит из некоторых допущений, которые опираются на наш повседневный опыт. Предполагается, что длина тел одинакова в любой СО и что время в различных СО течет одинаково.

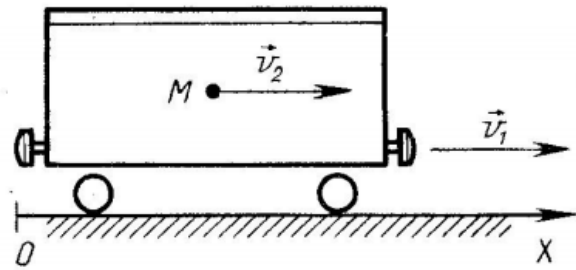
В классической механике пространство и время считаются абсолютными. Предполагается, что масса тела, а также все силы остаются неизменными при переходе из одной ИСО в другую. В справедливости принципа относительности нас убеждает повседневный опыт, например в равномерно движущемся поезде или самолете тела движутся так же, как и на Земле.

Не существует эксперимента, с помощью которого можно было бы установить, какая СО действительно покоится, а какая движется. Нет СО в состоянии абсолютного покоя.



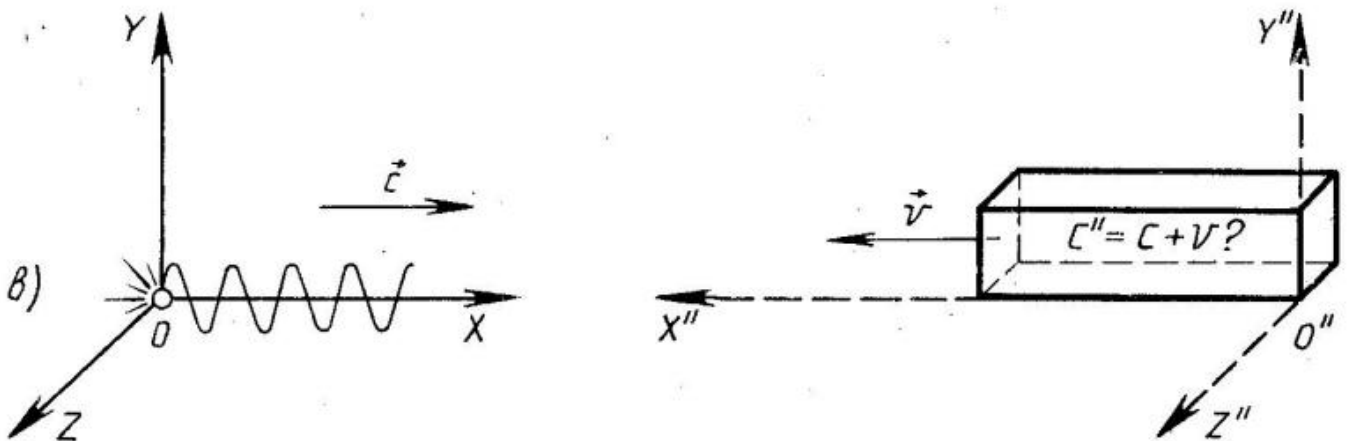
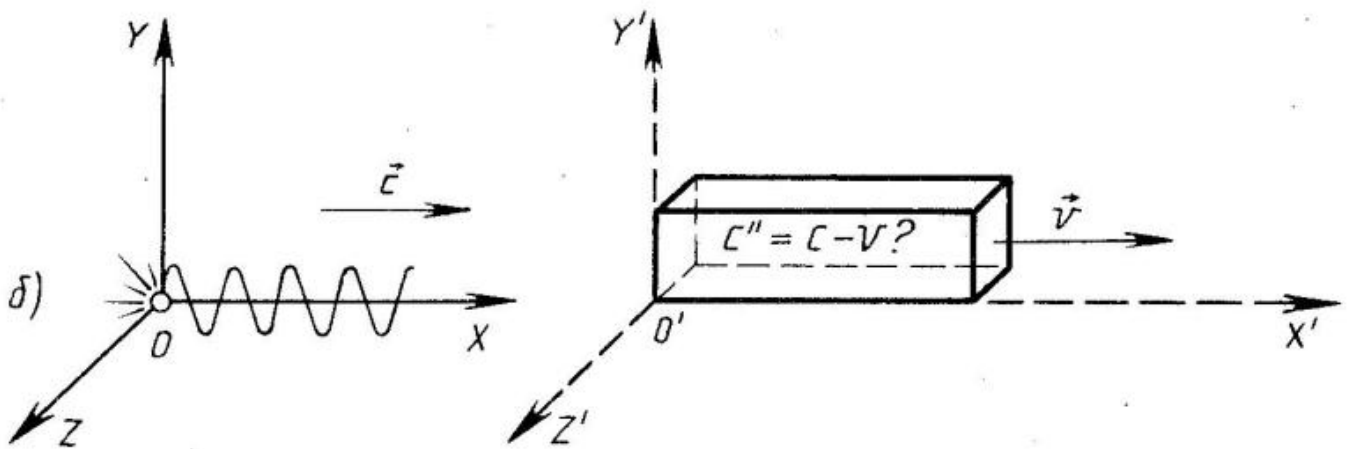
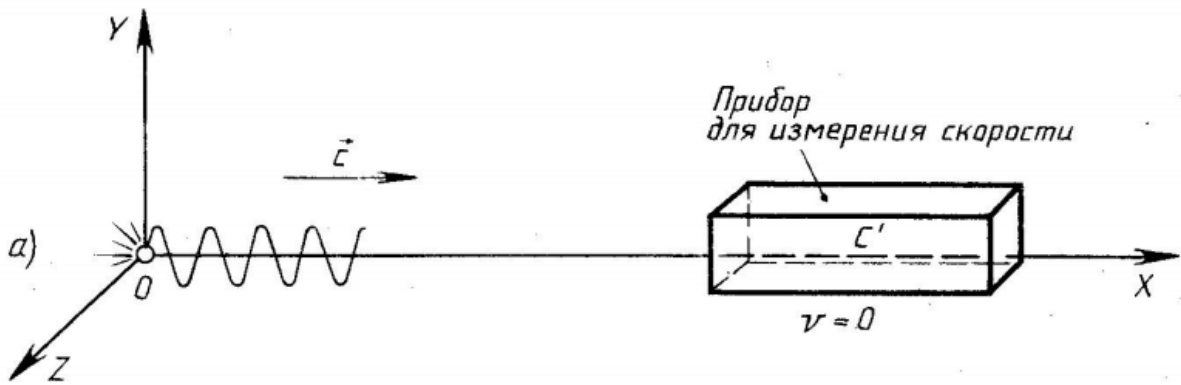
Если на движущейся тележке подбросить монету вертикально вверх, то в СО, связанной с тележкой, будет изменяться только координата  $OY$ . В СО, связанной с Землей, изменяются координаты  $OY$  и  $OX$ . Следовательно, положение тел и их скорости в разных СО различны.

Предположим, что вагон движется со скоростью  $v_1$ . В этом же направлении по оси  $OX$  движется материальная точка  $M$  со скоростью  $v_2$  относительно вагона. Тогда скорость точки  $M$  относительно Земли определяется по формуле  $u = v_1 + v_2$  — закон сложения скоростей в ньютоновской механике, где  $u$ ,  $v_1$ ,  $v_2$  — проекции векторов  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}_1$ ,  $\vec{v}_2$  на ось  $OX$ .



Если исходить из классического закона сложения скоростей для объектов, которые движутся со скоростью, соизмеримой со скоростью света, то прибор должен зарегистрировать:

- а)  $c' = c$ ; б)  $c'' = c - v$ ; в)  $c''' = c + v$ .



Если исходить из принципа относительности и распространить его на электромагнитное явление, то во всех трех случаях измерительный прибор должен показать

$$c' = c'' = c''' = c.$$

Получили противоречивые выводы — выяснить истинное положение может только эксперимент.

### **Специальная теория относительности**

Во второй половине XIX в. Максвелл, развивая свою теорию электромагнетизма, показал, что свет — электромагнитная волна. Уравнение Максвелла подсказало, что скорость света  $c \approx 3,00 \cdot 10^8$  м/с. Предсказанная скорость света совпала с экспериментально измеренным значением в пределах погрешности. Но в какой СО  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с?

В уравнениях Максвелла нет оговорок насчет относительной скорости. Так как физики рассматривали материальный мир с точки зрения законов механики, предположили, что свет распространяется в какой-то среде, и назвали эту прозрачную среду эфиром, который заполняет все пространство. Предположим, что значение скорости, по Максвеллу, достигается в СО, связанной с эфиром. Тогда скорость света в разных СО различна? Физики принялись определять скорость света относительно эфирного ветра. А. Майкельсон и Э. Морли провели опыт по измерению скорости света в СО, связанной с Землей: в направлении движения Земли и в перпендикулярном ему направлении. Никакого различия в скорости света им обнаружить не удалось. Это означало, что никакой особой среды светоносного эфира не существует. Противоречия между механикой Ньютона и электродинамикой Максвелла послужили стимулом для создания А. Эйнштейном теории относительности (1905).

#### **Постулаты теории относительности**

Толчком к созданию специальной теории относительности послужили размышления А. Эйнштейна над некоторыми проблемами электромагнитной теории и теории света.

А. Эйнштейн пришел к выводу, что обнаруженные им в электромагнитной теории противоречия обусловлены предположением существования абсолютного пространства.

*Первый постулат: законы физики имеют одинаковую форму во всех инерциальных системах отсчета.* Этот постулат явился обобщением принципа относительности Ньютона не только на законы механики, но и на законы остальной физики. Первый постулат — принцип относительности.

*Второй постулат: свет распространяется в вакууме с определенной скоростью  $c$ , не зависящей от скорости источника или наблюдателя.*

Эти два постулата образуют основу теории относительности А. Эйнштейна.

## Релятивистский закон сложения скоростей

Классический закон сложения скоростей  $u = v_1 + v_2$  не может быть справедливым, так как он противоречит утверждению о том, что  $c = \text{const}$ .

Запишем (без доказательства) закон сложения скоростей для частного случая, когда тело  $A$  движется вдоль оси  $OX$  со скоростью  $v_1$  относительно системы отсчета  $K_1$ , а система отсчета  $K_1$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $v$ . Скорость тела  $A$  относительно системы  $K$  обозначим через  $u$ . Тогда согласно релятивистскому закону сложения скоростей

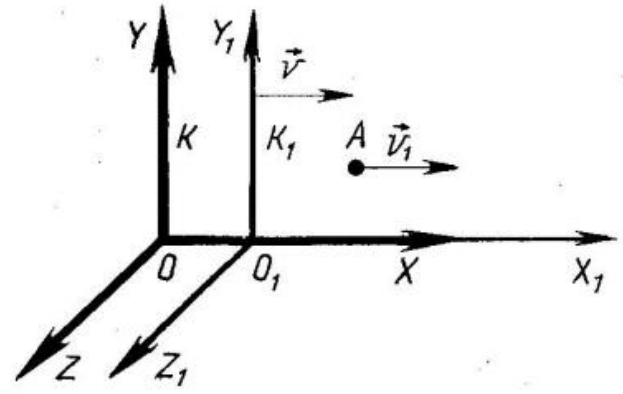
$$u = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}$$

Для малых скоростей, если  $v \ll c$  и  $v_1 \ll c$ , то членом  $\frac{v_1 v}{c^2}$  можно пренебречь.

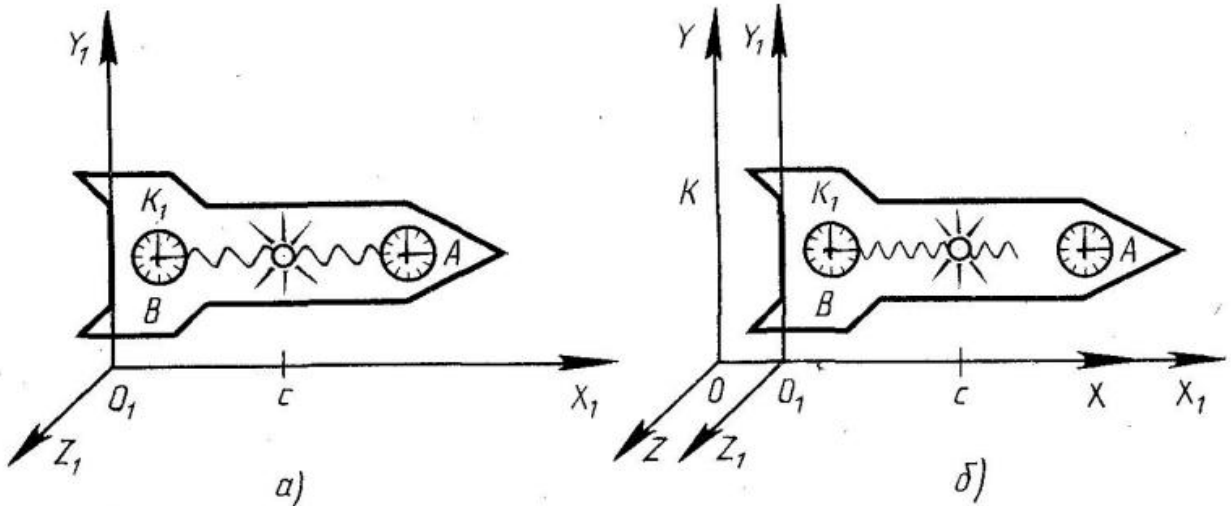
Получим классический закон сложения скоростей  $u = v_1 + v$ .

При  $v_1 = c$  и  $u = c$  скорость  $u = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c \frac{c + v}{c + v} = c$ .

Согласно закону сложения скоростей при любых значениях  $v_1$  скорость  $u \leq c$ .



## Относительность одновременности



Согласно представлениям классической механики два события, происходящие одновременно в какой-либо инерциальной си-

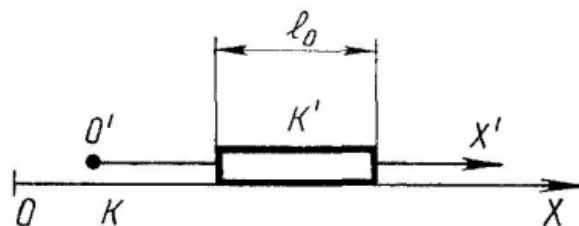
стеме отсчета (ИСО), являются одновременными и в любой другой ИСО. Это следует из ньютоновской концепции абсолютного времени. Из второго постулата теории относительности, согласно которому скорость распространения сигналов является величиной конечной, следует, что в разных ИСО время течет по-разному. Поэтому согласно теории относительности события, являющиеся одновременными в одной ИСО, неодновременны в другой ИСО, движущейся относительно первой.

#### Относительность промежутков времени

Промежуток времени между двумя событиями имеет наименьшее значение в системе отсчета, связанной с движущимся объектом, где происходит исследуемое явление, которое определяется по формуле  $t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Из этой формулы следует, что

длительность одного и того же процесса различна в системах  $K$  и  $K_1$ . В системе  $K_1$  длительность процесса больше. Следовательно, он протекает медленнее, чем в системе  $K$ . Время, отсчитываемое по часам, которые движутся вместе с телом, называют *собственным временем*  $t_0$ . Оно самое короткое; наблюдается релятивистский эффект замедления времени ( $t > t_0$ ).

#### Относительность понятий длины



В классической механике считается очевидным, что длина стержня имеет одинаковое значение во всех ИСО. Согласно же теории относительности длина тела не является абсолютной величиной, а зависит от скорости движения тела относительно ИСО и определяется по формуле

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где  $l_0$  — собственная длина стержня;  $l$  — длина этого стержня в системе отсчета  $K'$ , относительно которой стержень движется со скоростью  $u$ . Из этой формулы следует  $l < l_0$ , что значит: в ИСО, движущихся друг относительно друга со скоростью, близкой к скорости света в вакууме, наблюдается релятивистский эффект сокращения длины тела.

#### Релятивистский импульс

В теории относительности импульс определяется по формуле

$$\vec{p} = m\vec{u}.$$

Величину  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  называют релятивистской массой, измеренной в ИСО, относительно которой движется тело со скоростью  $u$ . Следовательно,

$$p = \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = Ft.$$

Так как  $m$  и  $F = \text{const}$ , то после несложных преобразований можно доказать, что при  $t \rightarrow \infty$  получим  $u \rightarrow c$ , что соответствует предельному характеру скорости света в вакууме.

### **Закон взаимосвязи массы и энергии**

Полную энергию свободного тела можно определить как произведение его релятивистской массы на квадрат скорости света в вакууме:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}.$$

Полная энергия тела пропорциональна его массе.

В той ИСО, где тело покоится, его собственная энергия (энергия покоя или внутренняя энергия) равна:  $E_0 = m_0 c^2$ .

Если изменяется энергия системы, то изменяется и ее масса:  $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$ . Всякое изменение любой энергии (тела, частицы, системы тел) на  $\Delta E$  сопровождается пропорциональным изменением массы на  $\Delta m$ .

Для случая движения тела с небольшой скоростью ( $u \ll c$ ) энергия  $E \approx m_0 c^2 + \frac{m_0 u^2}{2}$ .

Если  $u = 0$ , то  $E = m_0 c^2$ . Следовательно,  $m_0 c^2$  — это энергия, которой обладает неподвижное тело. Ее обозначают как  $E_0 = m_0 c^2$ .

Любое тело независимо от его движения и взаимодействия с другими телами и обладает энергией, пропорциональной массе покоя этого тела. Пример превращения энергии покоя в энергию излучения — это реакция превращения водорода в гелий. При превращении 1 кг водорода в гелий появляется дефект массы  $\Delta m_0 = 0,007$  кг. Соответствующее уменьшение энергии покоя выделяется в виде излучения:

$$E = \Delta m c^2 = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ Дж} = 6,3 \cdot 10^{14} \text{ Дж}.$$

Нельзя говорить, что при этом масса переходит в энергию. В действительности энергия переходит из одной формы (механической) в другие (электромагнитную и ядерную).