

# Комментарии к лекциям по физике

## Тема: Предпосылки и постулаты частной теории относительности

### Содержание лекции

Инерциальные системы отсчета. Физическая эквивалентность инерциальных систем отсчета (классический принцип относительности). Преобразования Галилея и преобразование скорости. Ограниченный характер классических представлений о пространстве и времени. Принцип относительности и электродинамика. Универсальный характер скорости света в вакууме. Постулаты теории относительности и их физическое содержание. Частная теория относительности — физическая теория пространства и времени.

### Принцип относительности

Частая теория относительности — современная физическая теория, характеризующая общие свойства пространства и времени в отсутствие полей тяготения и в умеренно слабых гравитационных полях.

Дедуктивное построение частной теории относительности базируется на двух фундаментальных принципах, или постулатах, которые представляют собой обобщение большого числа экспериментальных фактов:

- принцип относительности;
- принцип существования предельной скорости распространения взаимодействий.

Принцип относительности выражает ограниченную независимость законов физики от состояния движения. Эта независимость заключается в равноправии (эквивалентности) всех инерциальных систем отсчета — законы физики должны быть одинаковы во всех таких системах. Эквивалентность инерциальных систем отсчета означает, что равномерное прямолинейное движение замкнутой системы материальных тел не влияет на ход процессов, происходящих внутри физической системы. Находясь в закрытой лаборатории, никакими опытами невозможно установить, покоится лаборатория относительно выбранной инерциальной системы отсчета или движется относительно нее с постоянной скоростью. Подчеркнем, что движение лаборатории с ускорением (в частности, вращение) сразу обнаруживает себя по влиянию на многие явления.

Утверждение о физической эквивалентности всех инерциальных систем отсчета составляет содержание *принципа относительности*. Принцип относительности впервые был сформулирован Галилеем для механических явлений. Но равноправие инерциальных систем не может ограничиваться только механическими явлениями («чисто механических» явлений попросту не существует) и потому должно распространяться на всю физику. Обобщение принципа относительности, сформулированное А. Эйнштейном в 1905 году, заключается в распространении его на

любые явления. Эйнштейновский принцип относительности подтверждается всей совокупностью наших знаний о природе.

Согласно принципу относительности математическая форма законов физики должна быть одинакова во всех инерциальных системах отсчета, т.е. уравнения законов должны сохранять справедливость при переходе от одной инерциальной системе отсчета к другой.

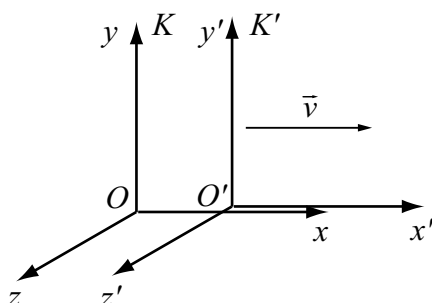


Рис. 1: Система отсчета  $K'$  движется относительно  $K$  с постоянной по величине и направлению скоростью  $\vec{v}$  вдоль оси  $Ox$

На основе классических представлений о пространстве и времени сразу устанавливается вид преобразования, связывающего координаты  $x, y, z$  и время  $t$  некоторого события, зафиксированные в системе отсчета  $K$ , с координатами и временем  $x', y', z', t'$  этого же события, зафиксированными в другой системе отсчета  $K'$ , движущейся относительно  $K$  с постоянной скоростью  $\vec{v}$  в направлении оси  $Ox$  (рис. 1):

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'. \quad (1)$$

Эти простые формулы носят название *преобразований Галилея*. Вводя радиусы-векторы  $\vec{r}$  и  $\vec{r}'$ , указывающие в каждой из систем  $K$  и  $K'$  положение той точки, в которой произошло рассматриваемое событие, можно записать первые три соотношения преобразований Галилея (1) в векторном виде:  $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t$ . Уравнения классической механики инвариантны относительно преобразований Галилея, т.е. удовлетворяют принципу относительности, если переход от одной инерциальной системы отсчета к другой математически производится с помощью преобразований Галилея (1), которые соответствуют классическим представлениям об абсолютном характере времени и пространственных расстояний.

Вся совокупность известных экспериментальных данных говорит о том, что принцип относительности распространяется *на все физические явления*: как механические, так и электромагнитные, и оптические процессы протекают совершенно одинаково во всех инерциальных системах отсчета. Исторически наиболее важные опыты, подтверждающие универсальный характер принципа относительности, — это оптический опыт Майкельсона и Морли с интерферометром специальной конструкции (см. [1], [4]) и электродинамический опыт Трутона и Нобля с заряженным конденсатором, подвешенным на упругой нити (конец 19 века). Но уравнения электродинамики не удовлетворяют принципу относительности, если переход

от одной системы отсчета к другой производить по формулам преобразований Галилея (1). В самом деле, скорость распространения электромагнитных волн (света) в вакууме согласно уравнениям Максвелла одинакова по всем направлениям и равна электродинамической постоянной  $c$ . Но, с другой стороны, в соответствии с классическими представлениями, скорость света может быть одинакова по всем направлениям только в одной инерциальной системе отсчета (системе «неподвижного эфира»). Например, если скорость света равна  $c$  в системе отсчета  $K$ , то в системе отсчета  $K'$  свет должен распространяться в положительном направлении оси  $Ox$  со скоростью  $c - v$ , а в отрицательном — со скоростью  $c + v$ .

Разрешить возникшие противоречия можно только ценой отказа от казавшихся незыблемыми классических представлений о пространстве и времени, сложившихся на основе многолетнего опыта наблюдений за сравнительно медленными движениями. Отказ от преобразований Галилея и введение вместо них новых преобразований — преобразований Лоренца, оставляющих неизменными при переходе от одной системы отсчета к другой уравнения электродинамики, а не уравнения механики, потребовал пересмотра и уточнения законов классической механики, а главное — потребовал коренной ломки сложившихся представлений о свойствах пространства и времени.

## **Принцип существования предельной скорости распространения взаимодействий**

Второй релятивистский постулат связан с принципом причинности и с возможными реализациями системы отсчета, т.е. с пространственно-временными измерениями). Коротко его суть можно сформулировать как утверждение, что в пустом пространстве свет никогда не может обогнать свет. В вакууме скорость светового сигнала не зависит от длины волны света, от его интенсивности, поляризации и других характеристик, а также от движения источника. Одно из многочисленных экспериментальных подтверждений этого утверждения — наблюдение света, испускаемого спектрально-двойными звездами.

Второй постулат, логически связанный с принципом относительности, утверждает, что любые взаимодействия между телами распространяются в пустоте с универсальной конечной скоростью, не зависящей от движения тел и равной скорости света в вакууме  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с. В соответствии с первым постулатом эта скорость одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Она определяет тот минимальный промежуток времени, по истечении которого до тела может прийти первый сигнал, дающий знать об изменении, которое произошло с другим телом. Существование универсальной предельной скорости распространения взаимодействий означает наличие общего предела для скорости передачи каких-либо действий и сигналов, любых силовых полей независимо от их физической природы. Второй постулат утверждает также, что невозможно движение тел со скоростью, превышающей предельную универсальную скорость  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

На первый взгляд может показаться, что второй постулат противоречит первому постулату о равноправии всех инерциальных систем. Действительно, скорости изменяются при переходе к другой системе отсчета. Поэтому скорость передачи взаимодействий, казалось бы, не может иметь одно и то же значение во всех системах отсчета. Изменение этой скорости при переходе в другую систему отсчета

нарушало бы декларируемую первым постулатом эквивалентность всех инерциальных систем. Однако дело здесь не в несовместимости первого и второго постулатов друг с другом, а в их несовместимости с классическими представлениями об абсолютном характере времени и пространственных расстояний. Поэтому объединение этих постулатов в теории относительности потребовало коренного пересмотра основных классических понятий, относящихся к пространству и времени.

Отметим, что второй постулат находится в противоречии с принятым в классической механике способом описания взаимодействия материальных частиц, который неявно включает предположение о мгновенности распространения взаимодействий. В самом деле, в классической механике считается, что силы, действующие на каждую частицу со стороны остальных, зависят от положения частиц в этот же момент времени. Изменение положения какой-либо из частиц мгновенно отражается на остальных. Поэтому второй постулат неизбежно требует пересмотра и уточнения законов механики.

Механика теории относительности переходит в классическую механику, основанную на мгновенности распространения взаимодействий, в предельном случае, когда скорости тел малы по сравнению со скоростью света  $c$ . В этом отношении новая — релятивистская — механика удовлетворяет *принципу соответствия*, согласно которому новая теория, приходящая на смену старой, должна сводиться к старой теории в той области явлений, где старая теория выдержала серьезную проверку на опыте. Только большой величиной скорости распространения взаимодействий объясняется тот факт, что для макроскопических тел часто достаточно точной оказывается классическая механика.

*Рекомендуемая литература:*

[1], стр. 88–94, стр. 358–360.

[2], стр. 511–514.

[3], стр. 28–36.

[5], стр. 29–34.

[6], стр. 4–11.

## Список литературы

- [1] Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Механика (берклиевский курс физики, т. 1). М., «Наука», 1971.
- [2] Стрелков С.П. Механика. М., «Наука», 1975.
- [3] Тэйлор Э.Ф., Уилер Дж.А. Физика пространства-времени. М., «Мир», 1969.
- [4] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 2 (пространство, время, движение). М., «Мир», 1966.
- [5] Фок В. А. Теория пространства, времени и тяготения. М., «Физматгиз», 1961.
- [6] Бутиков Е. И. Релятивистские представления в курсе общей физики. Спб, 2006.