

## **Тема: Основы специальной теории относительности**

Специальная (или частная) теория относительности (СТО) представляет собой современную физическую теорию пространства и времени. Наряду с квантовой механикой, СТО служит теоретической базой современной физики и техники. СТО часто называют релятивистской теорией, а специфические явления, описываемые этой теорией, – релятивистскими эффектами. Эти эффекты наиболее отчетливо проявляются при скоростях движения тел, близких к скорости света в вакууме  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с. Специальная теория относительности была создана А. Эйнштейном (1905 г.). Предшественниками Эйнштейна, очень близко подошедшими к решению проблемы, были нидерландский физик Х. Лоренц и выдающийся французский физик А. Пуанкаре.

### **Постулаты СТО**

**Принцип относительности Галилея и электромагнитные явления. Постулаты Эйнштейна. Преобразование Лоренца. Пространство и время в специальной теории относительности.**

Классическая механика Ньютона прекрасно описывает движение макротел, движущихся с малыми скоростями ( $v \ll c$ ). В нерелятивистской физике принималось как очевидный факт существование единого мирового времени  $t$ , одинакового во всех системах отсчета. В основе классической механики лежит механический принцип относительности (или принцип относительности Галилея): законы динамики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета. Этот принцип означает, что законы динамики инвариантны (т. е. неизменны) относительно преобразований Галилея, которые позволяют вычислить координаты движущегося тела в одной инерциальной системе ( $K$ ), если заданы координаты этого тела в другой инерциальной системе ( $K'$ ). В частном случае, когда система  $K'$  движется со скоростью  $v$  вдоль положительного направления оси  $x$  системы  $K$  (рис. 4.1.1), преобразования Галилея имеют вид:

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

Предполагается, что в начальный момент оси координат обеих систем совпадают.

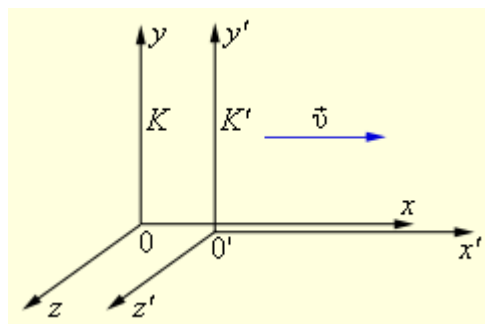


Рисунок 1. Две инерциальные системы отсчета  $K$  и  $K'$

Из преобразований Галилея следует классический закон преобразования скоростей при переходе от одной системы отсчета к другой:

$$u_x = u'_x + v, \quad u_y = u'_y, \quad u_z = u'_z.$$

Ускорения тела во всех инерциальных системах оказываются одинаковыми:

$$a_x = a'_x, \quad a_y = a'_y, \quad a_z = a'_z \quad \text{или} \quad \vec{a} = \vec{a}'.$$

Следовательно, уравнение движения классической механики (второй закон Ньютона)  $m\vec{a} = \vec{F}$  не меняет своего вида при переходе от одной инерциальной системы к другой.

К концу XIX века начали накапливаться опытные факты, которые вступали в противоречие с законами классической механики. Большие затруднения возникли при попытках применить механику Ньютона к объяснению распространения света. Предположение о том, что свет распространяется в особой среде – эфире, было опровергнуто многочисленными экспериментами. Американский физик А. Майкельсон сначала самостоятельно в 1881 году, а затем совместно с Э. Морли (тоже американец) в 1887 году пытался обнаружить движение Земли относительно эфира («эфирный ветер») с помощью интерференционного опыта. Упрощенная схема опыта Майкельсона–Морли представлена на рис. 2.

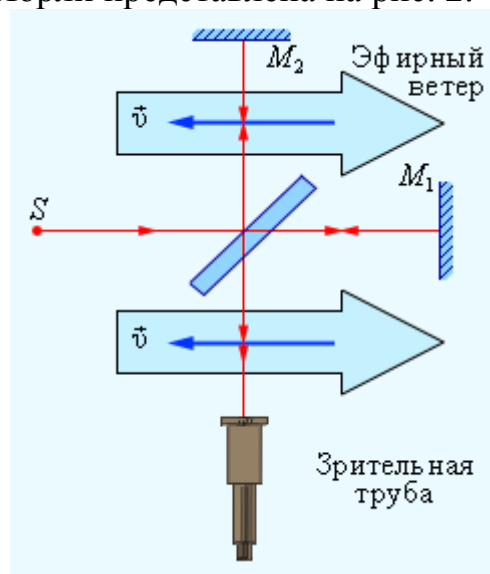


Рисунок 2. Упрощенная схема интерференционного опыта Майкельсона–Морли.

$\vec{v}$  – орбитальная скорость Земли

В этом опыте одно из плеч интерферометра Майкельсона устанавливалось параллельно направлению орбитальной скорости Земли ( $v = 30$  км/с). Затем прибор поворачивался на  $90^\circ$ , и второе плечо оказывалось ориентированным по направлению орбитальной скорости. Расчеты показывали, что если бы неподвижный эфир существовал, то при повороте прибора интерференционные полосы должны были сместиться на расстояние, пропорциональное  $(v/c)^2$ . Опыт Майкельсона–Морли, неоднократно повторенный впоследствии со все более возрастающей точностью, дал отрицательный результат. Анализ результатов опыта Майкельсона–Морли и ряда других экспериментов позволил сделать вывод о том, что представления об эфире как среде, в которой распространяются световые волны, ошибочны. Следовательно, для света не существует избранной (абсолютной) системы отсчета. Движение Земли по орбите не влияет на оптические явления на Земле.

Исключительную роль в развитии представлений о пространстве и времени сыграла теория Максвелла. К началу XX века эта теория стала общепризнанной. Предсказанные теорией Максвелла электромагнитные волны, распространяющиеся

с конечной скоростью, уже нашли практическое применение – в 1895 году А. С. Поповым было изобретено радио. Но из теории Максвелла следует, что скорость распространения электромагнитных волн в любой инерциальной системе отсчета имеет одно и то же значение, равное скорости света в вакууме. Это значит, что уравнения, описывающие распространение электромагнитных волн, не инвариантны относительно преобразований Галилея. Если электромагнитная волна (в частности, свет) распространяется в системе отсчета  $K'$  (рис. 1) в положительном направлении оси  $x'$ , то в системе  $K$  свет должен, согласно галилеевской кинематике распространяться со скоростью  $c + v$ , а не  $c$ .

Итак, на рубеже XIX и XX веков физика переживала глубокий кризис. Выход был найден Эйнштейном ценой отказа от классических представлений о пространстве и времени. Наиболее важным шагом на этом пути явился пересмотр используемого в классической физике понятия абсолютного времени. Классические представления, кажущиеся наглядными и очевидными, в действительности оказались несостоятельными. Многие понятия и величины, которые в нерелятивистской физике считались абсолютными, т. е. не зависящими от системы отсчета, в эйнштейновской теории относительности переведены в разряд относительных.

Так как все физические явления происходят в пространстве и во времени, новая концепция пространственно-временных закономерностей не могла не затронуть в итоге всю физику.

В основе специальной теории относительности лежат два принципа или постулата, сформулированные Эйнштейном в 1905 г.

**Принцип относительности:** все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой. Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы (не только механические) имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы природы, в том числе и на электромагнитные. Этот обобщенный принцип называют принципом относительности Эйнштейна.

**Принцип постоянства скорости света:** скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Скорость света в СТО занимает особое положение. Это предельная скорость передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую.

Эти принципы следует рассматривать как обобщение всей совокупности опытных фактов. Следствия из теории, созданной на основе этих принципов, подтверждались бесконечными опытными проверками. СТО позволила разрешить все проблемы «доэйнштейновской» физики и объяснить «противоречивые» результаты известных к тому времени экспериментов в области электродинамики и оптики. В последующее время СТО была подкреплена экспериментальными данными, полученными при изучении движения быстрых частиц в ускорителях, атомных процессах, ядерных реакций и т. п.

Постулаты СТО находятся в явном противоречии с классическими представлениями. Рассмотрим такой мысленный эксперимент: в момент времени  $t =$

0, когда координатные оси двух инерциальных систем  $K$  и  $K'$  совпадают, в общем начале координат произошла кратковременная вспышка света. За время  $t$  системы сместятся относительно друг друга на расстояние  $vt$ , а сферический волновой фронт в каждой системе будет иметь радиус  $ct$  (рис. 3), так как системы равноправны и в каждой из них скорость света равна  $c$ .

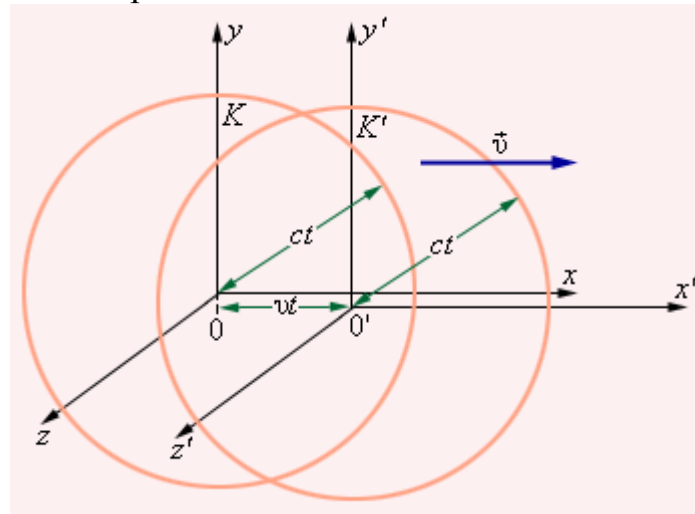


Рисунок 3. Кажущееся противоречие постулатов СТО

С точки зрения наблюдателя в системе  $K$  центр сферы находится в точке  $O$ , а с точки зрения наблюдателя в системе  $K'$  он будет находиться в точке  $O'$ . Следовательно, центр сферического фронта одновременно находится в двух разных точках!

Причина возникающего недоразумения лежит не в противоречии между двумя принципами СТО, а в допущении, что положение фронтов сферических волн для обеих систем относится к одному и тому же моменту времени. Это допущение заключено в формулах преобразования Галилея, согласно которым время в обеих системах течет одинаково:  $t = t'$ . Следовательно, постулаты Эйнштейна находятся в противоречии не друг с другом, а с формулами преобразования Галилея. Поэтому на смену галилеевых преобразований СТО предложила другие формулы преобразования при переходе из одной инерциальной системы в другую – так называемые преобразования Лоренца, которые при скоростях движения, близких к скорости света, позволяют объяснить все релятивистские эффекты, а при малых скоростях ( $v \ll c$ ) переходят в формулы преобразования Галилея. Таким образом, новая теория (СТО) не отвергла старую классическую механику Ньютона, а только уточнила пределы ее применимости. Такая взаимосвязь между старой и новой, более общей теорией, включающей старую теорию как предельный случай, носит название **принципа соответствия**.