СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (СТО)

ВВЕДЕНИЕ

Специальная (частная) теория относительности приобрела особо важную роль в системе образования учителя физики, поскольку элементы СТО теперь вошли в программу средней школы.

В основе СТО лежит принцип относительности, который сводится к утверждению, что состояние равномерного прямолинейного движения не влияет на течение физических явлений (это крайне нечеткое утверждение, оно будет в дальнейшем разъяснено). В инерциальных системах отсчета, т. е. в системах, движущихся равномерно и прямолинейно, описание всех явлений природы производится одинаковым образом. Основной задачей СТО является определение условий, при которых описание всех явлений природы в инерциальных системах отсчета (ИСО) оказывается тождественным. Формулируя иначе, можно считать основной задачей СТО выявление законов физики, не зависящих от выбора ИСО.

С основными опытными фактами, на которые опирается СТО, студенты знакомятся уже в курсе общей физики, и поэтому в данном разделе эксперимент привлекается не для обоснования теории, а для иллюстрации правильности ее выводов.

Специальная теория относительности не похожа на другие разделы физики. Сравнительно прост ее математический аппарат, просты ее постулаты. Но за этой простотой кроется хитрое переплетение идей и открытий, ставших достоянием физики начала XX в. При изучении основ СТО потребуется критический пересмотр ряда привычных, якобы самоочевидных, основанных на «здравом смысле», понятий и представлений. Кажущаяся парадоксальность многих выводов СТО проистекает именно из того, что мы свыклись с рядом представлений и понятий, приняв их (в значительной мере интуитивно, без достаточных оснований) за извечные, непреложные истины.

§ 62. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Система отсчета. При постановке любого физического эксперимента подразумевается, что эксперимент осуществляется в определенных условиях, в определенной системе. Наиболее привычно применение системы отсчета в механике. Механика начинается с описания движения, а для этого прежде всего нужно иметь тело, относительно которого рассматривается движение других тел. С выбранным телом связывается (или на это тело наносится) система координат. В геометрии, говоря о координатной системе, не обязательно помнить, что координатная система связывается с телом. Система координат в физике обязательно связана с материальным телом. Для простоты мы будем пользоваться исключительно прямоугольной декартовой системой координат.

Далее везде будем иметь в виду тела малых размеров и не будем рассматривать вращение тел. В механике о таких телах говорят как о материальных точках. В СТО вместо «материальная точка» принято говорить «частица». Для описания движения частицы необходимы еще часы. Чтобы определить скорость частицы, движущейся равномерно вдоль оси X, нужно знать ее координаты x_1 и x_2 в соответствующие моменты времени t_1 и t_2. Тогда скорость равна отношению $\frac{(x_2-x_1)}{(t_2-t_1)}$. Проще всего определить моменты t_1 и t_2 по часам, находящимся в точках x_1 и x_2. Значит, даже в столь простом случае желательно иметь двое часов. Но в механике Ньютона всегда подразумевается, что в каждой системе отсчета достаточно одних часов. Чтобы пояснить, в чем дело, введем два понятия, весьма существенные для СТО.

Событие — все то, что происходит в данный момент времени в данной точке (локализовано в малой области пространства за малый промежуток времени). Примеры событий: 1) мгновенная вспышка света в малой области пространства. 2) Частица движется по некоторой криволинейной траектории. В определенный момент времени t эта частица находится в некоторой точке с координатами x, y, z. Это тоже событие (положение частицы в данной точке в данный момент времени).

Событие характеризуют четыре числа — три пространственные координаты x, y, z и отсчет времени t, который в СТО называется временно́й координатой. Мы будем говорить, что числа x, y, z, t — это «координаты событий». Определяя скорость, нужно определить координаты двух событий, т. е. (x_1, t_1) и (x_2, t_2).

Как же по часам, находящимся, например, в начале системы отсчета, узнать, когда частица оказалась в точке x_1, а затем в точке x_2? В механике Ньютона считалось, что, когда частица будет в точке x_1 (или x_2), оттуда можно без промедления (мгновенно) сообщить об этом в ту точку, где расположены часы. В СТО говорят о передаче сообщения (информации) как о передаче сигнала.

Сигнал — это любой процесс, позволяющий передать из одной точки пространства в другую точку силовое воздействие, которое может, например, что-либо «включить» или «выключить» в этой точке.

Передать сигнал из точки *1* в точку *2* — это значит сообщить прибору, находящемуся в точке *2*, импульс (передать импульс —

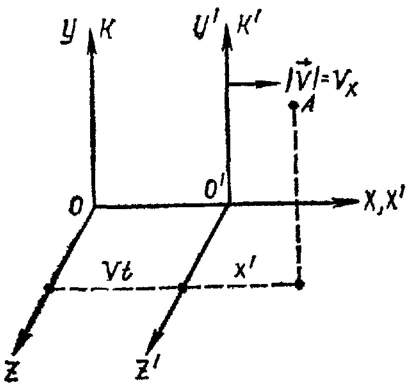

Рис. 85

это и есть «подействовать силой»). Но импульс всегда передается вместе с энергией. Поэтому сигнал — передача энергии и импульса на расстояние. Классическая механика допускает передачу энергии и импульса с бесконечно большой скоростью. Допустив существование бесконечно быстрых сигналов, можно ограничиться одними часами (неподвижными в данной системе отсчета), чем и пользуются в классической (ньютоновской) механике. Итак, система отсчета классической механики включает в себя тело отсчета, координатную систему, часы, а также эталоны длины и времени.

Принцип относительности Галилея. Выбор системы отсчета достаточно произволен. Можно, например, изменять масштабы координатной системы. Нас это интересовать не будет. Рассмотрим две системы отсчета, находящиеся в относительном движении. Пусть система K' движется относительно системы K со скоростью V. Сделанный выбор координатных систем (рис. 85) является достаточно общим, так как мы рассматриваем вакуум и исходим из того, что пространство однородно и изотропно.

Пространство однородно в том смысле, что все его точки равноправны. Пространство изотропно в том смысле, что его свойства по всем направлениям одинаковы. Из однородности пространства вытекает, что выбор начала отсчета координатной системы безразличен. Из изотропности пространства следует, что, поворачивая оси координат системы отсчета, можно привести их к расположению, изображенному на рисунке 85, без влияния на свойства систем. Нас будут интересовать системы отсчета, движущиеся друг относительно друга поступательно (без вращения), равномерно и прямолинейно. Подразумевается, что каждая из систем отсчета K и K' имеет нужные приборы для измерений. Все эти приборы покоятся в своей системе отсчета.

В 1632 г. в книге «Диалоги о двух главнейших системах мира» Галилей сформулировал принцип относительности. На современном физическом языке его можно изложить следующим образом: состояние равномерного прямолинейного движения не оказывает влияния на течение механических процессов; если производятся тождественные опыты в системах отсчета, находящихся в состоянии равномерного прямолинейного движения, они ведут к тождественным результатам. Чтобы описание явлений было одинаковым, системы отсчета должны «строиться» тождественно. Если при тождественных опытах получаются тождественные результаты, то основные законы механики должны записываться одинаково для всех таких систем отсчета. (Уравнения одинаковы, но входящие в них величины количественно определяются эталонами длины и времени своей системы отсчета.)

Покажем, что законы Ньютона не могут быть справедливыми во всех системах отсчета. Пусть частица покоится относительно системы K и на нее не действует сила. Относительно системы K', движущейся с ускорением $\vec{a}$, эта частица имеет ускорение $-\vec{a}'$, т. е. на нее по II закону Ньютона действует сила $\vec{F}^* = -m\vec{a}$. Согласно III закону все силы — это силы взаимодействия. В нашем примере $\vec{F}^*$ — сила инерции («фиктивная» сила); силы противодействия нет.

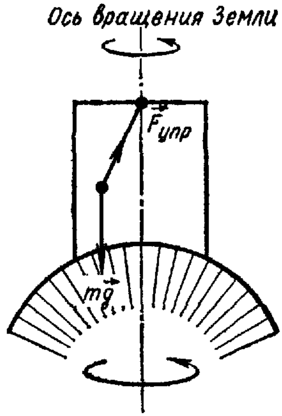

Рис. 86

Инерциальными системами отсчета (ИСО) называют системы отсчета, в которых справедливы все три закона Ньютона. Инерциальная система отсчета должна быть найдена из опыта. Рассмотрим известный опыт с маятником Фуко (рис. 86). На маятник, отклоненный в сторону, действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити $\vec{F}_{упр}$, направленные под углом друг к другу и лежащие в одной плоскости. (Для простоты рисунок изображен так, как будто опыт проводился на одном из полюсов Земли (Северном или Южном).)

Если Земля — ИСО, то плоскость качания маятника должна оставаться неизменной. Опыт показывает, что плоскость качания поворачивается. Следовательно, Земля — не инерциальная система. В качестве ИСО часто рассматривают систему отсчета, оси которой направлены на неподвижные звезды (такая система не вращается). Выбор начала отсчета для этой системы произволен, но удобнее начало совместить с Солнцем (гелиоцентрическая система), особенно если нужно рассматривать движение планет.

Систему отсчета, жестко связанную с Землей, называют геоцентрической (она не является инерциальной системой отсчета).

Согласно принципу относительности Галилея любая система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно гелиоцентрической системы, также является инерциальной. Различие между ИСО состоит в их относительной скорости.

Переход от одной ИСО к другой эквивалентен проведению преобразований Галилея (или Лоренца), т. е. сопоставлению результатов наблюдений в обеих системах.

Принцип относительности и законы Ньютона. Мы уже говорили, что если частица движется, то ее нахождение в данной точке траектории x, y, z в момент времени t есть событие. Движение частицы есть последовательность событий.

Во второй закон Ньютона

$$m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \vec{F} \qquad (62.1)$$

входят координаты событий. Сила в общем случае является функцией расстояния между двумя точками траектории (двух событий), т. е. $\vec{F}$ может быть функцией $(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$. При переходе от одной ИСО к другой координаты событий будут изменяться. Чтобы выяснить, что происходит с уравнениями механики при переходе от одной ИСО к другой, нужно выяснить, как преобразуются координаты и время события.

Пусть в инерциальной системе K определено событие (x, y, z, t). Координаты этого события в другой ИСО определяются при помощи преобразований Галилея (см. рис. 86), вытекающих из геометрических соображений. В системе K', движущейся прямолинейно относительно K с переносной скоростью $V = V_x$, координаты того же самого события равны:

$$x' = x - Vt; \ y' = y; \ z' = z, \ t' = t. \qquad (62.2)$$

Формулу обратного перехода можно получить, если изменить знак переносной скорости на обратный:

$$x = x' + Vt'.$$

Здесь оси OX и $O'X'$ совпадают, а оси OY и $O'Y'$, OZ и $O'Z'$ попарно параллельны (поскольку $V = V_x$); $t' = t$, так как сигналы для информации о времени наступления события в обеих системах предполагаются бесконечно быстрыми (скорость движения системы отсчета в этом случае несущественна). Кроме того, в этих формулах преобразования координат события при переходе от инерциальной системы K к системе K' (преобразования Галилея) предположено, что в момент времени $t = 0$ оба начала координат O и O' совпадают.

Запишем преобразования Галилея в векторной форме:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{V}t, \ t' = t, \ \vec{V}(V, 0, 0). \qquad (62.3)$$

Если $\vec{r} = \vec{r}(t)$ — закон движения частицы в системе K, то закон ее движения в системе K' определяется формулой (62.3)

$$\vec{r}'(t') = \vec{r}(t) - \vec{V}t. \qquad (62.4)$$

Найдем скорость частицы, продифференцировав формулу (62.4) по t (или t'):

$$\frac{d\vec{r}'}{dt'} = \frac{d\vec{r}}{dt} - \vec{V}, \text{ т. е. } \vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}. \qquad (62.5)$$

Формула (62.5) определяет преобразование скорости частицы при переходе от K к K', т. е. выражает закон сложения скоростей в классической механике: скорости, если они невелики, складываются как векторы. Дальше мы увидим, что скорости, близкие к скорости света в вакууме (релятивистские скорости), преобразуются иначе.

Запишем основное уравнение классической динамики (второй закон Ньютона) в системе K: $\frac{d}{dt}(m\vec{v})=\vec{F}$; при $m=\text{const}$ $m\frac{d\vec{v}}{dt}=\vec{F}$. Если принцип относительности Галилея справедлив, то вид второго закона Ньютона должен сохраняться и в системе K'. Преобразование координат и времени при переходе от K к K' дается соотношениями (62.2), а преобразование скорости — соотношением (62.5). Дифференцируя соотношение (62.5), получим:

$$\frac{d\vec{v}'}{dt'}=\frac{d\vec{v}}{dt}. \qquad (62.6)$$

Поскольку $m=\text{const}$, левая часть второго закона Ньютона остается одинаковой во всех ИСО. Если сила зависит от расстояния между частицами, от относительной скорости частиц и от времени, то она тоже сохраняет свое значение во всех ИСО. Действительно, нетрудно убедиться, что $\vec{r}_2-\vec{r}_1=\vec{r}'_2-\vec{r}'_1$, $\vec{v}_2-\vec{v}_1=\vec{v}'_2-\vec{v}'_1$, $t=t'$.

Таким образом, правая часть второго закона Ньютона также не изменяется при переходе от одной ИСО к другой. Следовательно, во всех ИСО второй закон Ньютона имеет один и тот же вид:

в системе K:

$$\frac{d}{dt}(m\vec{v})=\vec{F},$$

в системе K':

$$\frac{d}{dt'}(m\vec{v}')=\vec{F}'.$$

Теперь уже ясно, почему в принцип относительности Галилея необходимо вводить начальные условия. Второй закон Ньютона выражается дифференциальным уравнением второго порядка относительно координат. Его решение содержит шесть произвольных постоянных. Сами уравнения одинаковы в обеих системах. Чтобы физические явления происходили тождественно, решения уравнений также должны быть тождественными. Для этого, кроме одинаковых уравнений, нужны одинаковые начальные условия: обычно это начальные координаты и начальная скорость частицы.