Принцип относительности Галилея

Темы кодификатора ЕГЭ: инерциальные системы отсчёта, принцип относительности Галилея.

Изучение теории относительности Эйнштейна мы начинаем с более глубокого рассмотрения принципа относительности Галилея. Это позволит нам лучше понять, каковы были предпосылки создания теории относительности.

Ключевую роль в механике и теории относительности играет понятие инерциальной системы отсчёта. Если вы забыли, что это такое, то обязательно прочитайте ещё раз небольшой листок «Первый закон Ньютона».

В конце этого листка было кратко сказано о принципе относительности Галилея. Настало время поговорить о нём подробнее. В чём же суть данного принципа?

Наблюдатель на корабле

Представьте себе, что вы находитесь в каюте корабля. Никакого движения в пространстве вы не ощущаете — вам кажется, что корабль стоит на месте. Но вас всё же интересует, покоится ли корабль или движется равномерно и прямолинейно. Можете ли вы установить это, не выглядывая в иллюминатор?

Допустим, что с данной целью вы производите всевозможные эксперименты, наблюдая различные *механические* явления в вашей каюте. Вы исследуете свободное падение тел, соскальзывание тела с наклонной плоскости, вращательное движение, колебания маятников, распространение звуковых волн... Вам детально известен ход этих явлений в неподвижной лаборатории на земле, и теперь вы пытаетесь найти какие-либо отклонения в их протекании, вызванные равномерным прямолинейным движением судна.

Никаких отклонений обнаружить не удастся! Поставив в каюте корабля любой механический эксперимент и сопоставив его с аналогичным экспериментом на земле, вы увидите, что полученные результаты не отличаются друг от друга. Например, вы бросаете мячик со скоростью 5 м/с под углом 60° к горизонту относительно палубы. Оказывается, мячик на корабле опишет ровно ту же самую траекторию, что и на берегу при тех же начальных условиях (скорость и угол броска).

Равномерное прямолинейное движение корабля никак не сказывается на протекании механических явлений на этом корабле. Поэтому никакой опыт из механики, проведённый в лаборатории корабля, не в состоянии определить, покоится ли корабль или движется равномерно и прямолинейно.

Систему отсчёта, связанную с землёй, во многих ситуациях можно считать инерциальной[1]. Система отсчёта корабля, движущаяся относительно земной системы отсчёта равномерно и прямолинейно, также будет инерциальной. Мы приходим к выводу, что с точки зрения механических явлений инерциальные системы отсчёта совершенно равноправны: никакой механический эксперимент не в состоянии выделить и сделать привилегированной какую-то одну инерциальную систему отсчёта по сравнению с остальными.

Это и есть принцип относительности, открытый Галилеем.

Принцип относительности Галилея. *Всякое механическое явление при одних и тех же начальных условиях протекает одинаково в любой инерциальной системе отсчёта.*

[1] Конечно, она не инерциальна. Земля совершает суточное вращение и движется вокруг Солнца, поэтому земная лаборатория будет иметь ускорение. Но во многих задачах этим ускорением можно пренебречь.

Инвариантность законов механики

Принцип относительности Галилея означает, что законы механики одинаковы во всех инерциальных системах отсчёта. А именно, математическая форма второго и третьего законов Ньютона не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой. Давайте убедимся в этом непосредственно на следующем простом примере.

Рассмотрим две системы отсчёта: K и K'. Координатные оси этих систем сонаправлены. Систему K будем считать неподвижной. Система K' движется относительно неё с постоянной скоростью $\vec{v}$ вдоль общего направления осей X и X' (рис. 1).

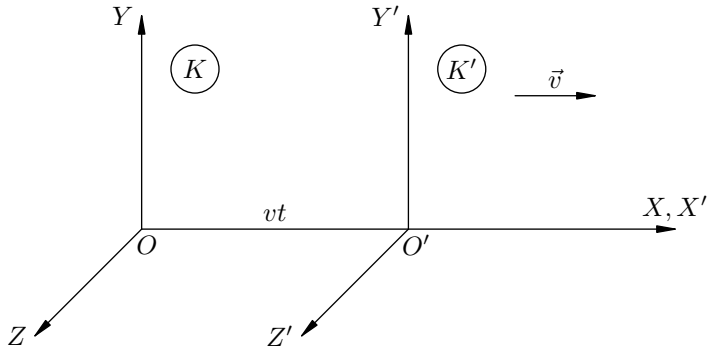

Рис. 1. Система K' движется относительно системы K

В тот момент, когда начала координат O и O' совпадали, часы обеих систем были выставлены на ноль и запущены. Стало быть, часы в системах K и K' идут синхронно, показывая одно и то же время t. В момент времени t расстояние OO' равно vt.

Нас интересует, как описывается движение тела (для определённости называемого далее *частицей*) в системах отсчёта K и K'.

Прежде всего, выясним, как связаны друг другом координаты частицы и моменты времени в обеих системах отсчёта.

Пусть в момент времени t по часам K частица имеет в системе K координаты x, y, z. Вообще, четвёрка чисел (x, y, z, t) называется *событием*. Событие состоит в том, что в данной точке пространства в данный момент времени что-то происходит — вот, например, в точке с координатами x, y, z в момент времени t оказывается наша частица.

В системе K' это же событие описывается четвёркой чисел (x', y', z', t'). А именно, местонахождение частицы в системе K' описывается координатами x', y', z', а часы K' показывают при этом время t'.

Глядя на рис. 1, совершенно ясно, что x' будет меньше x на величину vt, координата y' совпадает с y, а z' совпадает с z. Кроме того, как уже было сказано, время на часах K' и K одно и то же: $t' = t$.

Итак, имеем:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t. \tag{1}$$

Формулы (1) называются *преобразованиями Галилея*. Они связывают координаты и время одного и того же события, измеренные в разных инерциальных системах отсчёта: в движущейся системе K' и неподвижной системе K.

Таким образом, *преобразования Галилея в механике служат математическим описанием перехода от одной инерциальной системы отсчёта к другой*. Рассмотрим некоторые следствия, вытекающие из преобразований Галилея.

Пусть наша частица имеет в системе K скорость $\vec{u}$, а в системе K' — скорость $\vec{u}\,'$. Как связаны между собой эти скорости? Дифференцируем первые три равенства (1) по времени

(которое одинаково в обеих системах отсчёта):

$$\dot{x}' = \dot{x} - v, \quad \dot{y}' = \dot{y}, \quad \dot{z}' = \dot{z}.$$

Производные координат по времени — это проекции скоростей:

$$u'_x = u_x - v, \quad u'_y = u_y, \quad u'_z = u_z. \tag{2}$$

Три равенства (2) можно записать в виде одной векторной формулы:

$$\vec{u}\,' = \vec{u} - \vec{v},$$

или

$$\vec{u} = \vec{u}\,' + \vec{v}.$$

Получился хорошо известный нам закон сложения скоростей: скорость тела относительно неподвижной системы отсчёта есть скорость тела относительно движущейся системы отсчёта плюс скорость движущейся системы относительно неподвижной. Мы видим, таким образом, что *закон сложения скоростей в механике является следствием преобразований Галилея.*

Дифференцируем по времени ещё раз — на сей раз соотношения (2). Производная постоянной величины v обращается в нуль, и мы получаем равенство ускорений:

$$a'_x = a_x, \quad a'_y = a_y, \quad a'_z = a_z,$$

или

$$\vec{a}\,' = \vec{a}.$$

Итак, *ускорение частицы одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.* Это ещё одно следствие преобразований Галилея.

Теперь запишем второй закон Ньютона для нашей частицы в системе K:

$$m\vec{a} = \vec{F}. \tag{3}$$

При переходе в систему K' ускорение частицы $\vec{a}$, как мы выяснили, остаётся прежним. А что можно сказать об остальных двух величинах, входящих в (3), — массе и силе?

Масса есть мера инертности тела; масса показывает, в какой степени тело «сопротивляется» изменению скорости. Но приращение скорости Δu нашей частицы будет одним и тем же в любой инерциальной системе отсчёта. Следовательно, *масса частицы m во всех инерциальных системах отсчёта одинакова.*

Силы в механике зависят от расстояний между телами и, быть может, скоростей тел друг относительно друга. Но расстояние между двумя точками пространства одинаково во всех инерциальных системах отсчёта. Скорость одной частицы относительно другой также не зависит от того, в какой инерциальной системе отсчёта рассматривается движение. Стало быть, *сила $\vec{F}$ одинакова во всех инерциальных системах отсчёта.*

Величины и соотношения, не меняющиеся при определённых условиях, часто называются *инвариантными.* Так, ускорение, масса и сила инвариантны относительно выбора инерциальной системы отсчёта. Поэтому второй и третий законы Ньютона во всех системах отсчёта имеют одинаковый вид, т. е. инвариантны относительно преобразований Галилея.

Законы механики инвариантны относительно преобразований Галилея — такова альтернативная формулировка принципа относительности Галилея. Подчеркнём, что речь идёт об инвариантности математической формы законов механики. В результате этой инвариантности одно и то же механическое явление, наблюдаемое при одних и тех же начальных условиях, будет протекать одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.