

# ГЛАВА IX

## ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

\* \*

### § 101. Принцип относительности в ньютоновской и релятивистской механике

1. *Теория относительности — фундаментальная физическая теория, охватывающая всю физику.* Она возникла в начале XX века в результате преодоления принципиальных трудностей, с которыми столкнулась электродинамика и оптика движущихся тел. Настойчивые и мучительные попытки преодолеть эти трудности на основе гипотезы мирового эфира окончились неудачей. Теория относительности отказалась от использования гипотезы эфира. В ее основе лежат не гипотезы, а *принципы* или *постулаты*, твердо установленные экспериментально. В этом сила теории относительности, причина ее успехов. В нашу задачу не входит подробное изложение истории теории относительности и экспериментального обоснования ее постулатов. Мы коснемся этих вопросов предельно кратко, чтобы лучше оттенить принципиальные моменты, глубже уяснить смысл постулатов и содержание теории относительности.

Творцом теории относительности является Альберт Эйнштейн. Теория относительности была изложена им в 1905 г. в основополагающей работе «К электродинамике движущихся тел». Многие результаты этой работы были получены ранее Лармором (1857—1942), Лорентцом и Пуанкаре (1854—1912). Однако и Лармор и Лорентц принципиально стояли на точке зрения неподвижного эфира, с которым связывалась преимущественная система отсчета. Ближе всего к теории относительности был Пуанкаре, который еще в 1898 г. дал критику понятия одновременности пространственно разделенных событий, повторенную в дальнейшем Эйнштейном. Пуанкаре заполнил также математические пробелы и устранил ошибки, допущенные Лорентцом. Однако принципиально новое и глубокое физическое понимание всей проблемы и последовательное построение теории относительности с единой точки зрения содержится лишь в упомянутой выше работе Эйнштейна, написанной к тому же без всякого влияния своих предшественников.

2. Начнем с повторения того, что было сказано в первом томе о принципе относительности в ньютоновской механике. Основной закон ньютоновской механики выражается уравнением

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}, \quad (101.1)$$

где  $F$  — сила, действующая на материальную точку, а  $r$  — радиус-вектор, определяющий положение последней относительно какой-либо инерциальной системы отсчета. Возьмем две инерциальные системы отсчета, одну из которых будем обозначать через  $S$  и называть *неподвижной* (или *нештрихованной*), а другую — через  $S'$ , называя ее *движущейся* (или *штрихованной*). Пусть система  $S'$  движется относительно системы  $S$  равномерно и прямолинейно со скоростью  $V$ . Если  $r$  и  $r'$  — радиусы-векторы, определяющие положения движущейся материальной точки относительно этих систем отсчета в момент времени  $t$ , то они связаны между собой *преобразованием Галилея*

$$r = r' + Vt. \quad (101.2)$$

При этом в ньютоновской механике предполагается, что время  $t$  *абсолютно*, т. е. одинаково во всех системах отсчета. Для простоты отсчет времени ведется с того момента, когда начала координат систем  $S$  и  $S'$  совмещаются между собой. Это не отражается на общности рассуждений.

Дважды дифференцируя соотношение (101.2) по времени, найдем *формулы преобразования скорости и ускорения*:

$$v = v' + V, \quad a = a'. \quad (101.3)$$

Таким образом, *ускорение инвариантно относительно преобразования Галилея*, т. е. одинаково в обеих системах отсчета  $S$  и  $S'$ . Радиусы-векторы  $r$  и  $r'$ , скорости  $v$  и  $v'$  не одинаковы. Однако *разности радиусов-векторов, а также скоростей двух любых материальных точек одни и те же*, поскольку они определяют *относительные положения и скорость* одной точки относительно другой. Сила  $F$  в ньютоновской механике зависит только от *разностей радиусов-векторов и скоростей* взаимодействующих материальных точек. Поэтому она, а с ней и уравнение Ньютона (101.1) не меняются при преобразовании Галилея. То же относится и к дифференциальным уравнениям движения систем материальных точек в механике Ньютона. Таким образом, получается следующий результат:

*Уравнения механики Ньютона, определяющие изменения состояния движения механических систем, инвариантны относительно преобразования Галилея.*

Это положение называется *принципом относительности Галилея*. Ему можно дать также следующую формулировку:

*Законы природы, определяющие изменения состояния движения механических систем, не зависят от того, к какой из двух инерциальных систем отсчета, движущихся одна относительно другой прямолинейно и равномерно, они относятся.*

Дорелятивистская физика считала обе формулировки тождественными, поскольку при равномерном поступательном движении инерциальных систем отсчета относительно друг друга она не до-

пускала никакого другого преобразования  $r$  и  $t$ , кроме преобразования Галилея. На самом деле вторая формулировка *более общая*, чем предыдущая, так как в ней не конкретизирован вид того преобразования координат и времени, относительно которого инвариантны уравнения механики. В дальнейшем, если не сделано специальной оговорки, принцип относительности понимается во *второй формулировке*.

3. Принцип относительности отнюдь не утверждает, что одно и то же физическое явление выглядит одинаково в различных инерциальных системах отсчета. Дело в том, что одни только дифференциальные уравнения механики не определяют движение системы. К ним необходимо присоединить еще *начальные условия*, например задать координаты и скорости всех взаимодействующих частиц в определенный момент времени. А эти начальные условия меняются при переходе от одной системы отсчета к другой. Именно из-за различия начальных условий движение предмета, свалившегося с полки равномерно движущегося вагона, происходит вниз по прямой линии, если его рассматривать относительно самого вагона, тогда как относительно полотна железной дороги то же движение совершается по параболе. Вот почему в формулировке принципа относительности говорится не об одинаковости явлений, а об *одинаковости законов*, определяющих изменение состояний движения механических систем.

Смысл принципа относительности можно также уяснить на следующем примере. Возьмем замкнутую систему тел  $A$  и зададим их начальные положения и скорости относительно инерциальной системы отсчета  $S$ . Пусть имеется тождественная с  $A$  другая замкнутая система тел  $A'$ , в которой созданы в точности такие же начальные условия, но уже относительно инерциальной системы отсчета  $S'$ . Тогда движение в системе тел  $A$  относительно  $S$  будет тождественным с движением в системе тел  $A'$  относительно  $S'$ . В этом и состоит *равноправие* инерциальных систем отсчета, устанавливаемое принципом относительности.

Принципиально взаимодействие имеет место между любыми телами Вселенной. Поэтому, если бы и существовали замкнутые системы, то единственной из таких систем могла бы быть, строго говоря, только вся Вселенная. Но тогда принцип относительности в том смысле, какой ему придан в последнем примере, был бы бессодержательным, так как двух Вселенных не существует. Принцип относительности только потому сохраняет содержание, что многими взаимодействиями, ввиду их слабости, можно пренебречь и таким путем выделить практически бесконечное множество ограниченных систем тел, каждая из которых приближенно ведет себя как *замкнутая*. В какой степени та или иная система удовлетворяет этому условию, зависит от исследуемого вопроса и от точности, какая предъявляется при его изучении. Достаточно ли для (приближенной) замкнутости системы отдаленности всех масс, не входящих

в рассматриваемую систему? Ответ в соответствии с опытом гласит, что в случае *равномерного и прямолинейного движения* (относительно инерциальной системы отсчета) этого *достаточно*, а для всех остальных видов движения *недостаточно*.

4. Явления природы не представляется возможным разделить на чисто «механические» и «немеханические». Если бы даже это и можно было сделать, то принцип относительности не мог бы относиться к одним только «механическим» явлениям. Действительно, всякое «механическое» явление связано с множеством «физических» явлений и обусловлено ими. И если бы принцип относительности не был справедлив для этих «физических» явлений, то он не мог бы оставаться справедливым и для «чисто механических» явлений. Поэтому принцип относительности необходимо распространить на *все явления природы* и дать ему следующую формулировку:

*Законы природы, определяющие изменение состояний физических систем, не зависят от того, к какой из двух инерциальных систем отсчета, движущихся одна относительно другой прямолинейно и равномерно, они относятся.*

Это положение называется *частным, или специальным, принципом относительности Эйнштейна*. Он устанавливает равноправие *только инерциальных систем отсчета*. На основе этого принципа Эйнштейн создал в 1905 г. *частную, или специальную, теорию относительности*. Через 10 лет он обобщил принцип относительности на случай *произвольных неинерциальных систем отсчета* и создал *общую теорию относительности*, иначе называемую *релятивистской теорией тяготения*. Эта фундаментальная теория приобрела особое значение в связи с астрофизическими открытиями последнего времени. Общая теория относительности стала *основной теорией* в астрофизике, в частности в космологии. Однако в нашем курсе мы можем ограничиться изложением только специальной теории относительности.

## § 102. Опыт Майкельсона

1. Основные уравнения электродинамики Максвелла — Лорентца *не инвариантны относительно преобразования Галилея*. Действительно, скорость света в вакууме, вычисленная из этих уравнений, равна постоянной  $c$ . Такой результат оставался бы верным во всех инерциальных системах отсчета, если бы в них уравнения Максвелла имели один и тот же вид. Но это несовместимо с законом сложения скоростей (101.3), который является следствием преобразования Галилея.

Неинвариантность уравнений Максвелла относительно преобразования Галилея, как думали физики конца XIX и начала XX веков, не противоречит, однако, принципу относительности. Дело в том, что во всех электродинамических явлениях, помимо обыкновенного