
Принцип относительности

Со времен Аристотеля и средневековых схоластов развитие физики шло в направлении большей «релятивизации», т. е. учета относительного характера явлений. Так, Коперник заложил основы для отказа от представления, что существуют особые места в пространстве и моменты во времени, имеющие абсолютное значение в том смысле, что они должны играть исключительную роль привилегированной системы отсчета при математическом выражении законов физики. Вместе с этим росло, конечно, понимание того, что в пространстве нет «абсолютного направления», т. е. что вид законов физики не меняется при повороте системы координат. Затем было обнаружено, что законы механики инвариантны относительно преобразований Галилея, иначе говоря, уравнения Ньютона *сохраняют свой вид* независимо от скорости движения системы отсчета.

Такое развитие физики в направлении относительного описания явлений наталкивалось на трудности и приводило к возникновению новых проблем при исследовании свойств света и электромагнитных явлений. Так как скорость света конечна (равна c), то из преобразований Галилея следовало, что величина этой скорости относительно наблюдателя зависит от выбора его системы отсчета. Подобным же образом при преобразованиях Галилея, очевидно, не имеют инвариантного вида и уравнения Максвелла для электромагнитного поля, описывающие распространение света и других видов электромагнитного излучения, а также их поляризационные свойства. Другими словами, должна была бы существовать

привилегированная система отсчета, в которой точно выполнялись бы уравнения Максвелла, а скорость света была бы равна c во всех направлениях. Поэтому физики XIX века постулировали существование эфира — понятие, роль которого фактически сводилась к созданию физической основы для такой привилегированной системы отсчета.

Когда же соответствующие опыты (типа опыта Майкельсона — Морли) не подтвердили предсказаний простой теории эфира о свойствах этой системы отсчета, Лоренц предложил новую теорию, объяснившую отрицательные результаты таких опытов как следствие изменений, происходящих в измерительных приборах при движении их относительно эфира. Однако его теория привела к той трудности, что вопрос о точных величинах «истинных» расстояний и промежутков времени, взятых в системе, покоящейся относительно эфира, оказался туманным, а сами величины не поддавались определению.

Сущность эйнштейновского подхода состояла в отказе от представлений об абсолютных пространстве и времени, на которых основана гипотеза эфира, и в принятии вместо этого относительного подхода к электромагнитным явлениям и распространению электромагнитного излучения. Заметим, что законы движения Ньютона выражались *одними и теми же соотношениями* во всех равномерно движущихся системах, связанных между собой преобразованиями Галилея, а закон инвариантности наблюдаемой величины скорости света выражался *одним и тем же соотношением* во всех равномерно движущихся системах, связанных между собой преобразованиями Лоренца. Кроме того, как показывает дальнейший анализ, уравнения Максвелла обладают подобной же инвариантностью относительно преобразований Лоренца в том смысле, что эти уравнения сохраняют свой вид во всех системах координат, связанных между собой указанными преобразованиями (этот вопрос мы будем еще обсуждать в гл. 21). Следовательно, в этой части своей концепции Эйнштейн просто подытожил очевидные факты, а именно, что электромагнитное излучение количественно исследуется путем установления со-

ответствующих соотношений между электромагнитными явлениями и приборами и что, как известно из опыта, законы электродинамики выражаются *инвариантными* соотношениями между наблюдаемыми таким образом величинами. Под этой *инвариантностью* соотношений, выражающих законы электродинамики (уравнения Максвелла), мы понимаем сохранение ими неизменной формы независимо от места и времени наблюдения электромагнитных явлений и от выбора начала, ориентации осей и скорости систем отсчета (последние связаны между собой сдвигами, поворотами и преобразованиями Лоренца).

Однако ясно, что так как законы Ньютона инвариантны относительно преобразований Галилея, то они не могут быть инвариантными относительно преобразований Лоренца. Чтобы доказать это утверждение, запишем уравнения Ньютона сначала в заданной системе отсчета B , движущейся со скоростью v относительно другой системы A :

$$m \frac{du'}{dt'} = F.$$

Возьмем частицу, движущуюся в направлении оси z , вдоль которой направлена и скорость v . Если системы B и A связаны между собой преобразованием Лоренца, то уравнение (15.7) даст

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}.$$

Кроме того, величина dt' представляет собой промежуток времени (измеренный в системе отсчета B), за который наша частица проходит расстояние $dz' = u' dt'$. Тогда, согласно уравнениям (14.4), измеренный в системе A соответствующий промежуток времени dt будет равен

$$\begin{aligned} \frac{dt' + v dz'/c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} &= dt' \cdot \frac{1 + \frac{u'v}{c^2}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \\ &= \frac{dt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \left[1 + \frac{\frac{uv}{c^2} - \left(\frac{v}{c}\right)^2}{1 - \frac{uv}{c^2}} \right] = dt' \cdot \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - \frac{uv}{c^2}}. \quad (16.1) \end{aligned}$$

Так как $dv'/dt = 0$, получим уравнения Ньютона в виде

$$\begin{aligned} \frac{m \left(1 - \frac{uv}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \frac{d}{dt} \left[\frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}} \right] = \\ = \frac{m}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \frac{1 - \frac{uv}{c^2} - \left(\frac{u}{c}\right)^2}{1 - \frac{uv}{c^2}} \frac{du}{dt} = F. \end{aligned} \quad (16.2)$$

Отсюда ясно, что законы движения Ньютона *не инвариантны* относительно преобразований Лоренца. Вместе с тем обсуждавшиеся нами опытные факты (как и ряд других данных) свидетельствуют о том, что действительным преобразованием, связывающим между собой системы отсчета, должно быть преобразование Лоренца, а не Галилея и что законы механики остаются инвариантными для разных скоростей системы отсчета. Отсюда следует, что законы Ньютона *не могут быть* истинными законами механики (они лишь приближенные, справедливые в предельном случае, когда отношение v/c стремится к нулю).

Подход Эйнштейна к этой проблеме был основан на тщательном анализе физического смысла всех изложенных фактов. По определению, закон физики должен выражаться соотношением, справедливым без всяких исключений. Если же он справедлив не во всех случаях, то мы должны искать более общий закон, который позволит установить, когда эти исключения обнаружатся и почему их следует ожидать, иначе мы не можем полагаться на закон вообще (например, если он теряет свою силу в произвольных местах, моментах времени или каких-то особых условиях). Другими словами, *общий закон физики* — это просто утверждение, что существуют определенные *соотношения*, наблюдаемые в принципе в природе, которые инвариантны относительно места, времени, системы отсчета и других условий (например, температуры, давления и т. д.), при которых мы их наблюдаем.

Если истинным преобразованием, связывающим между собой различные системы отсчета, является преоб-

разование Лоренца, то вопрос о виде уравнений механики следует пересмотреть заново. При этом необходимо руководствоваться *принципом относительности*, как называл его Эйнштейн. Он утверждает то, о чем говорилось выше, т. е. законы физики должны быть *соотношениями одного и того же вида* в любой системе отсчета. Существует *частный*, или *специальный*, *принцип относительности*, касающийся *равномерно* движущихся систем, и *общий принцип относительности*, касающийся *произвольных* систем (например, движущихся ускоренно). В этой книге мы, конечно, ограничимся частным принципом относительности.

К принципу относительности можно подойти с более интуитивных позиций, рассматривая космический корабль, движущийся в пустоте и лишенный окон, равно как и любых других средств связи с внешним миром. Согласно принципу относительности, все явления, которые будут наблюдаться *внутри этого корабля*, не должны зависеть вообще от его скорости. Ясно, что теория эфира не удовлетворяет этому требованию, так как, согласно этой теории, свет обладает скоростью *с* относительно эфира, следовательно, наблюдаемая величина скорости света будет зависеть от скорости корабля. Вообще все электромагнитные явления (определяемые уравнениями Максвелла, справедливыми лишь в системе эфира) будут протекать по-разному в зависимости от скорости корабля.

Принцип относительности обладает огромной *эвристической ценностью*. Это значит, что он незаменим при установлении новых законов и соотношений, и не только в механике, но и во многих других областях. Именно если мы знаем соотношение, выполняющееся в ограниченной подсистеме системы отсчета, то принцип относительности приведет нас к обобщенному соотношению, справедливому независимо от систем отсчета, имеющему новое содержание в этих более широких рамках, поддающемуся проверке в дальнейших экспериментах. В последующих главах эта эвристическая роль принципа относительности будет продемонстрирована на ряде конкретных примеров.