

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ: СУЩНОСТЬ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ*

Математика оперирует исключительно с отношениями между понятиями, не принимая во внимание их связь с опытом. Физика также имеет дело с математическими понятиями, однако эти понятия приобретают физическое содержание лишь в том случае, когда их связь с объектами опыта четко определена. Так, в частности, обстоит дело с понятиями движения, пространства, времени.

Теория относительности — это физическая теория, основанная на последовательной физической интерпретации трех указанных понятий. Название «теория относительности» связано с тем, что движение, с точки зрения возможного опыта, всегда представляется как движение одного тела относительно другого (например, автомобиля относительно дороги или Земли относительно Солнца и неподвижных звезд). Движение никогда не наблюдается как «движение по отношению к пространству», иначе говоря, как «абсолютное движение». «Принцип относительности» в наиболее широком смысле состоит в следующем утверждении: все физические явления имеют такой характер, что не дают основания вводить понятие «абсолютного движения», или, более коротко, но менее точно, «абсолютного движения не существует».

Казалось бы мы мало что можем почерпнуть из такого рода отрицательного утверждения. Однако в действительности оно сильно ограничивает круг (мыслимых) законов природы. В этом смысле можно провести аналогию между теорией относительности и термодинамикой. Последняя также основана на отрицательном утверждении: «вечный двигатель невозможен».

* *Relativity: Essence of the Theory of Relativity*. Amer. People Encycl., 1949, XVI, Chicago.

Построение теории относительности включает в себя два этапа: построение «специальной теории относительности» и «общей теории относительности». Последняя предполагает справедливость первой в предельном случае и является ее последовательным обобщением.

А. Специальная теория относительности

Физическая интерпретация пространства и времени в классической механике. Геометрия, с физической точки зрения, представляет собой совокупность законов, согласно которым взаимно покоящиеся твердые тела можно располагать друг относительно друга (например, треугольник состоит из трех стержней, концы которых постоянно соприкасаются). Предполагается, что при такой интерпретации аксиомы Эвклида справедливы. «Пространство» в этом понимании представляет собой бесконечное твердое тело (или решетку), к которому отнесены положения всех прочих тел (тело отсчета). Аналитическая геометрия (Декарта) использует в качестве тела отсчета, представляющего пространство, три взаимно-перпендикулярных жестких стержня, вдоль которых измеряются каким-то способом «координаты» (x, y, z) точек пространства, определяемые как ортогональные проекции (с помощью жесткого масштаба).

Одновременность. Физика имеет дело с «событиями» в пространстве и времени. Каждому событию помимо трех пространственных координат x, y, z принадлежит временная координата t . Предполагается, что последняя измеряется часами (идеальным периодическим процессом) пренебрежимо малых размеров. Эти часы C следует считать покоящимися в одной из точек системы координат, например в начале координат ($x = y = z = 0$). Тогда время события, происшедшего в точке $P(x, y, z)$, определяется как показание часов, одновременное с событием. Здесь понятие «одновременности» предполагалось имеющим физический смысл без специального определения. Это — неточность, и она кажется безобидной лишь потому, что с помощью света (скорость которого практически бесконечна с точки зрения повседневного опыта) одновременность пространственно разделенных событий, казалось бы, можно установить непосредственно.

Специальная теория относительности устраняет эту неточность, вводя физическое определение одновременности с помощью световых сигналов. Время t события P есть показание часов C в момент прибытия светового сигнала, пришедшего от события, за вычетом времени, необходимого световому сигналу для преодоления расстояния до часов. Введение такой поправки основано на предположении (постулате) о постоянстве скорости света.

Это определение сводит понятие одновременности пространственно удаленных событий к понятию одновременности событий, происходящих в одном и том же месте (совпадение событий), а именно: к одновременности прибытия светового сигнала в S и отсчета времени часами S .

Инерциальные системы и принцип постоянства скорости света. Классическая механика основана на принципе Галилея: тело находится в состоянии равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока другие тела не воздействуют на него. Это утверждение не может быть справедливо для произвольно движущихся систем координат. Оно может претендовать на справедливость только для так называемых «инерциальных систем». Инерциальные системы движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Классическая физика претендует на справедливость своих законов лишь относительно всех инерциальных систем (специальный принцип относительности).

Теперь легко понять дилемму, которая привела к специальной теории относительности. Опыт и теория постепенно создали убеждение, что свет в пустом пространстве всегда распространяется с одной и той же скоростью и независимо от своего цвета и состояния движения источника света (принцип постоянства скорости света — в дальнейшем мы будем называть его « L -принципом»). Элементарные интуитивные соображения казалось бы говорят, что один и тот же луч света не может двигаться с одной и той же скоростью c по отношению ко всем системам координат. Казалось бы L -принцип противоречит специальному принципу относительности.

Однако это противоречие оказывается лишь кажущимся и основано на заблуждении относительно абсолютного характера времени или, скорее, одновременности удаленных событий. Мы видим, что координаты события x, y, z и t можно в данный момент определить лишь по отношению к некоторой избранной системе координат (инерциальной системе). Преобразование координат события x, y, z, t , которое следует выполнить при переходе от одной инерциальной системы к другой, нельзя осуществить, не пользуясь определенными физическими предположениями. Однако нижеследующий постулат оказывается достаточным для решения этой проблемы: L -принцип выполняется во всех инерциальных системах (приложение специального принципа относительности к L -принципу). Определенные таким образом и линейные по x, y, z, t преобразования называются преобразованиями Лоренца. Эти преобразования формально характеризуются требованием, чтобы выражение $dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$, составленное из разностей координат dx, dy, dz, dt двух бесконечно близких событий, было инвариантом (т. е., чтобы при преобразованиях оно переходило в то же самое выражение, образованное из разностей координат в новой системе).

С помощью преобразований Лоренца специальный принцип относительности может быть сформулирован следующим образом: законы природы инвариантны относительно преобразований Лоренца (т. е. закон природы не должен измениться, если отнести его к новой инерциальной системе при помощи преобразования Лоренца для x, y, z, t).

Основные результаты специальной теории относительности. Специальная теория относительности привела к ясным физическим представлениям о пространстве и времени и в связи с этим к выяснению того, как ведут себя движущиеся масштабы и часы. Она устранила понятие абсолютной одновременности, а также понятие мгновенного действия на расстоянии в смысле Ньютона. Она показала, как нужно изменить уравнения движения при рассмотрении движений со скоростью, не очень малой по сравнению со скоростью света. Она разъяснила формально структуру уравнений Максвелла для электромагнитного поля; в частности, она позволила понять внутреннее единство электрического и магнитного полей. Она объединила законы сохранения импульса и энергии в единый закон и продемонстрировала эквивалентность массы и энергии. С формальной точки зрения, то, что было достигнуто специальной теорией относительности, можно охарактеризовать следующим образом. Она в общем виде указала роль, которую играет мировая постоянная c (скорость света) в законах природы, и продемонстрировала существование тесной связи между тем, как в эти законы входят пространственные координаты, с одной стороны, и время — с другой.

Б. Общая теория относительности

В одном фундаментальном пункте специальная теория относительности осталась верна основам классической механики; а именно, она сохранила утверждение, что законы природы справедливы только по отношению к инерциальным системам. Круг «допустимых» (т. е. оставляющих форму законов природы неизменной) преобразований координат ограничивается исключительно (линейными) преобразованиями Лоренца. Действительно ли это ограничение основано на физических фактах? Ниже следующие соображения убедительно говорят об обратном.

Принцип эквивалентности. Тело обладает инертной массой (противодействующей ускорению) и тяжелой массой (определяющей вес тела в заданном гравитационном поле; например, на поверхности Земли). Эти две величины, столь существенно различные по их определению, как показывает эксперимент, измеряются одним и тем же числом. Должна существовать более глубокая причина этого обстоятельства. Этот факт можно описать иначе: в гравитационном поле ускорения различных масс

одинаковы. Или, наконец, можно сказать так: в гравитационном поле тела ведут себя так же, как и в его отсутствие, если в последнем случае в качестве системы отсчета используется равномерно ускоренная система координат (а не инерциальная система).

В последнем случае, по-видимому, нет оснований отказываться от следующей интерпретации. Система рассматривается как «покоящаяся» и «кажущееся» гравитационное поле в ней рассматривается как «истинное». Такое гравитационное поле, «порожденное» ускорением системы координат, было бы, очевидно, бесконечно протяженным и не могло бы создаваться гравитирующими массами, сосредоточенными в конечном объеме. Однако если нашей целью является построение теории полевого типа, это обстоятельство не может помешать нам. При такой интерпретации инерциальные системы теряют свое особое значение и мы находим «объяснение» равенству тяжелой и инертной масс (одно и то же свойство материи проявляется либо как вес, либо как инерция, в зависимости от способа описания).

Если рассуждать формально, то, допуская системы координат, движущиеся ускоренно по отношению к исходным «инерциальным» системам, мы допускаем нелинейные преобразования координат и, следовательно, существенно расширяем идею инвариантности, т. е. принцип относительности.

Тщательный анализ с учетом результатов специальной теории относительности показывает, что при таком обобщении координаты нельзя уже интерпретировать как результаты измерений. Лишь разности координат в совокупности с полевыми величинами, описывающими гравитационное поле, определяют измеримые расстояния между событиями.

Коль скоро пришлось принять нелинейные преобразования координат как переход между двумя эквивалентными системами, то проще всего, по-видимому, требовать допустимости всех непрерывных преобразований координат (они образуют группу), т. е. считать допустимыми произвольные криволинейные системы координат, в которых поля описываются регулярными функциями (общий принцип относительности).

Гравитация в общей теории относительности. Теперь нетрудно понять, почему общий принцип относительности (на основе принципа эквивалентности) привел к теории тяготения. Существует частный случай пространства, физическую структуру которого (поле) мы можем предполагать точно известной, основываясь на специальной теории относительности. Это случай пустого пространства, в котором нет ни электромагнитных полей, ни вещества. Оно полностью определяется своим «метрическим» свойством: пусть dx_0, dy_0, dz_0, dt_0 — разности координат двух бесконечно близких точек (событий); тогда величина

$$ds^2 = dx_0^2 + dy_0^2 + dz_0^2 - dt_0^2 \quad (1)$$

может быть измерена и ее значение не зависит от конкретного выбора инерциальной системы. Если в этом пространстве ввести новые координаты x_1, x_2, x_3, x_4 посредством преобразования общего вида, то величина ds^2 для этой же пары точек будет иметь вид

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k \quad (2)$$

(здесь подразумевается суммирование по i и k от 1 до 4), причем $g_{ik} = g_{ki}$. Тогда величины g_{ik} , которые образуют «симметричный тензор» и являются непрерывными функциями x_1, \dots, x_4 , описывают, согласно «принципу эквивалентности», частный случай гравитационного поля [а именно, поле, которое можно вновь преобразовать к виду (1)]. Если воспользоваться работами Римана по метрическим пространствам, то свойства такого рода поля g_{ik} можно точно охарактеризовать («условием Римана»).

Однако мы ищем условия, которым удовлетворяют гравитационные поля «общего» вида. Естественно предположить, что их так же можно описать, как тензорные поля типа g_{ik} , которые, вообще говоря, не допускают преобразования линейного элемента к виду (1), т. е. удовлетворяют не условию Римана, а более слабым условиям, также не зависящим, подобно условию Римана, от выбора координат (т. е. инвариантным относительно преобразования общего вида). Простые формальные соображения приводят к более слабым условиям, которые тесно связаны с условием Римана. Эти условия и являются искомыми уравнениями для чисто гравитационного поля (в отсутствие вещества и электромагнитных полей).

Экспериментальные подтверждения общей теории относительности. Уравнения небесной механики Ньютона могут быть получены из этих уравнений как приближенные и, кроме того, можно найти малые поправки, которые описывают некоторые наблюдавшиеся на опыте эффекты (отклонение луча света гравитационным полем звезды, влияние гравитационного потенциала на частоту испущенного света, медленное вращение эллиптических орбит планет — смещение перигелия Меркурия). Кроме того, эти уравнения объясняют «разбегание» галактических систем, которое проявляется в красном смещении света, испускаемого этими системами.

Общая теория относительности пока еще неполна в том смысле, что общий принцип относительности может быть применен удовлетворительным образом только к гравитационным полям, но не ко всему полю. Нам до сих пор неизвестно, какой математический аппарат следует применять для описания всего поля в пространстве и каковы те общие инвариантные законы, которым подчиняется это поле. По-видимому, можно быть уверенным в одном: общий принцип относительности окажется необходимым и эффективным орудием в решении проблемы единого поля.