

Однако важнейший результат, достигнутый пока теорией относительности, — это вывод соотношения между инертной массой физической системы и содержанием энергии в ней. Пусть тело обладает в некотором определенном состоянии инертной массой M . Если этому телу сообщается каким-то образом энергия E , то, согласно теории относительности, его инертная масса возрастает вследствие этого до значения $M + \frac{E}{c^2}$, где c — скорость света в пустоте. Поэтому закон сохранения массы, считавшийся до сих пор справедливым, видоизменяется и объединяется в один закон с законом сохранения энергии. Этот результат говорит о том, что инертную массу M тела следует понимать как содержание энергии Mc^2 . Прямого экспериментального подтверждения этого важного результата у нас пока нет, однако мы знаем частные случаи, для которых справедливость «закона инерции энергии» можно доказать, не прибегая к теории относительности.

Развитие теории относительности было сильно ускорено благодаря математической формулировке ее основ, данной Г. Минковским. При этом Минковский исходил из того, что «временная координата» будет входить в основные уравнения теории относительности точно таким же образом, как и пространственные координаты, если вместо t ввести пропорциональную этой величине мнимую переменную $\sqrt{-1}ct$. Благодаря этому уравнения теории относительности становятся уравнениями в четырехмерном пространстве; при этом формальные свойства этого четырехмерного мира отличаются от формальных свойств пространства евклидовой геометрии только числом измерений.

II. Общая теория относительности

Специальная теория относительности основана на идее, что определенные системы координат (инерциальные системы) являются равноправными для формулировки законов природы; к таким системам координат принадлежат те, в которых выполняется закон инерции и закон постоянства скорости света в пустоте. Но являются ли эти системы координат на самом деле выделенными в природе, или же эта привилегированность возникает вследствие несовершенного понимания законов природы? Конечно, закон Галилея на первый взгляд выделяет инерциальные системы из всех других движущихся систем координат.

Но закон инерции обладает недостатком, который обесценивает этот аргумент.

Теперь представим себе часть пространства, свободную от действия сил в смысле классической механики, иными словами, достаточно удаленную от тяготеющих масс. Тогда в соответствии с механикой существует инерциальная система K , относительно которой масса M , предоставленная самой себе в рассматриваемой части пространства, движется прямолинейно и равномерно. Если теперь ввести систему координат K' , равномерно ускоренную относительно системы K , то по отношению к системе K' масса M , предоставленная самой себе, будет двигаться не по прямой, а по параболе, подобно тому, как движется масса вблизи поверхности Земли под действием силы тяжести.

Можно ли отсюда заключить, что система K' (абсолютно) ускорена? Это заключение было бы неправомерным. Систему K' можно с таким же правом считать «покоящейся», предполагая лишь, что в системе K' существует однородное гравитационное поле, являющееся причиной ускоренного движения тел относительно K' .

Против такого утверждения можно было бы возразить, что не указаны массы, порождающие это гравитационное поле. Однако их можно считать бесконечно удаленными, не вступая в противоречие с основами механики Ньютона. Кроме того, мы не знаем, с какой точностью соответствует действительности закон тяготения Ньютона.

Одно обстоятельство говорит в пользу нашего утверждения. Относительно системы K' все массы, независимо от их конкретных физических и химических свойств, падают с одинаковым ускорением. Опыт показывает, что это справедливо и для гравитационного поля, причем с необычайной точностью. Примечательный факт, что мы знаем гравитационное поле как состояние пространства, в котором поведение тел такое же, как и в системе K' , делает совершенно естественной гипотезу о том, что в системе K' существует гравитационное поле, по существу тождественное полям тяготения, порождаемым массами в соответствии с законом Ньютона.

При этом способе рассмотрения не существует никакого реального разделения на инерцию и гравитацию, поскольку ответ на вопрос о том, находится ли тело в определенный момент исключительно под действием инерции или под комбинированным воздействием инерции и гравитации, зависит от системы координат, т. е. от способа рассмотрения.

Итак, общеизвестные физические факты приводят нас к общему принципу относительности, т. е. к утверждению, что законы природы следует формулировать так, чтобы они выполнялись относительно произвольно движущихся систем координат.

Из сказанного выше непосредственно видно, что общий принцип относительности приводит к теории гравитационного поля. Именно, исходя из инерциальной системы K , в которой гравитационное поле отсутствует, и вводя движущуюся произвольным образом относительно K систему координат K' , так что в системе K' существует точно известное гравитационное поле, мы можем определять общие свойства гравитационных полей по общим свойствам тех гравитационных полей, которые получаются при переходе к системе K' .

В то же время неверно обратное утверждение, что всякое гравитационное поле соответствующим выбором системы координат можно исключить, т. е. получить пространство, свободное от тяготения. Например, гравитационное поле Земли нельзя исключить никаким выбором системы координат. Для *конечной* области это возможно только в случае гравитационных полей весьма специфического вида. Но для бесконечно малой области координаты всегда можно выбрать таким образом, что гравитационное поле будет отсутствовать в ней. Тогда можно считать, что в такой бесконечно малой области выполняется специальная теория относительности. Тем самым общая теория относительности связывается со специальной теорией относительности, и результаты последней переносятся на первую.

Простое рассуждение показывает, что путь луча света, распространяющегося в инерциальной системе K прямолинейно и равномерно, в системе координат K' , совершающей ускоренное поступательное движение, будет криволинейным. Отсюда мы заключаем, что лучи света искривляются гравитационным полем; в соответствии с принципом Гюйгенса это означает, что скорость света в гравитационных полях является функцией точки. Это следствие впервые было подтверждено во время солнечного затмения 1919 года.

Легко видеть далее, что, согласно общей теории относительности, гравитационное поле должно обладать значительно более сложной структурой, чем в теории Ньютона. Например, если система K' равномерно вращается относительно инерциальной системы K , то движение материальных точек относительно K' происходит таким образом, что ускорение зависит не только от их положения (центробежная сила), но и от скорости (сила Кориолиса).

Далее, исходя из лоренцовского сокращения, которое выше было получено как следствие специальной теории относительности, можно сделать вывод о том, что расположение практически жестких тел в системе K описывается геометрией Евклида неточно и что скорость хода одинаково устроенных часов является функцией точки. Другими словами, в общей теории относительности не существует геометрии и кинематики, независящих от физических процессов, так как свойства масштабов и часов определяются гравитационным полем.

С этим обстоятельством связано существенно более глубокое изменение, которое вносит в учение о пространстве и времени общая теория относительности, чем то, которое внесла специальная теория относительности. В последней, например, пространственные и временные координаты имеют непосредственный физический смысл: между двумя точками (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) данной системы координат можно уложить твердый масштаб, измеряющий длину

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2},$$

а разность времен $t_2 - t_1$ двух событий, происходящих в одной точке этой системы координат, непосредственно измеряется (одинаково устроенными для всех точек) часами, помещенными в этой точке (или в ее непосредственной окрестности). В общей теории относительности координатам уже нельзя приписывать такой непосредственный физический смысл. Хотя совокупность процессов, т.е. точечных событий, можно и здесь расположить в четырехмерном континууме (пространстве-времени), но свойства масштабов и часов (геометрия или вообще метрика) в этом континууме определяются гравитационным полем; последнее, таким образом, представляет собой физическое состояние пространства, одновременно определяющее тяготение, инерцию и метрику. В этом заключается углубление и объединение основ физики, достигнутое благодаря общей теории относительности.

В разительном контрасте с глубоким изменением, внесенным общей теорией относительности в основы физики, находится ничтожное различие между количественными предсказаниями новой и старой теорий. Кроме уже упомянутого искривления лучей света в гравитационном поле Солнца, обнаруживаемого только при полном солнечном затмении, следует назвать еще медленное вращение эллиптической орбиты планеты Меркурий (40 секунд за 100 лет), которое нашло объяснение в общей теории относительности, но не могло быть объяснено в теории

тяготения Ньютона. Наконец, общая теория относительности предсказывает незначительный сдвиг спектральных линий света, испускаемого атомами на поверхности Солнца или неподвижных звезд, по сравнению со спектральными линиями света, испускаемого на поверхности Земли. Наблюдениями установлено, что существование этого эффекта является весьма вероятным, но пока еще не вполне достоверным.