

ти. В пространственно-временном континууме  $R_4$  с римановой метрикой движение частицы изображается четырехмерной геодезической линией. Построим пространственно-временной континуум  $E_4$  с эвклидовой метрикой, соприкасающийся с  $R_4$  вдоль этой линии. Во всех точках линии величины  $g_{ij}$ ,  $G_{ij}$  и их первые производные по координатам соответственно одинаковы, вследствие чего вдоль линии одинаковы также символы Кристоффеля римановой и эвклидовой метрик. Поэтому линия соприкосновения, являясь геодезической в пространстве  $R_4$ , будет геодезической и в  $E_4$ . Отсюда следует, что любое конечное движение частицы в гравитационном поле произвольного строения можно представить геодезической линией в специально построенном пространстве-времени с эвклидовой метрикой. Это пространство-время пригодно для изображения только вполне определенного конечного движения частицы (т. е. движения в заданном поле и с заданными начальными условиями), поскольку  $E_4$  может соприкасаться с  $R_4$  лишь вдоль одной линии. Вместе с тем такое изображение достаточно полно, так как соприкасающаяся метрика вполне определяет действие поля гравитации на данную частицу.

Итак, конечное движение свободной материальной точки в поле гравитации можно описать геодезической линией как в римановом, так и в эвклидовом континуумах. При первом описании движение считается обусловленным истинным полем гравитации, а при втором его можно рассматривать как движение в кинематическом поле. Это позволяет формулировать принцип эквивалентности следующим образом: *для любого конечного движения свободной частицы в поле гравитации имеется возможность построить систему отсчета, в которой это движение происходит как в кинематическом поле.* В этой формулировке принцип эквивалентности является особенно убедительным аргументом, в пользу гипотезы Эйнштейна о единой природе инерции и тяготения.

**3. Принцип относительности.** Как уже сказано, ОТО представляет собой расширение СТО на основе общего принципа относительности, утверждающего равноправность ускоренных систем отсчета. Если в СТО постулируются одинаковые законы физики только в инерциальных системах отсчета, движущихся относительно друг друга без ускорений, то в ОТО это требование распространяется на все системы отсчета, по каким бы законам они ни двигались.

Специальный принцип относительности имеет, как известно, опытное происхождение и подготовлен развитием механики и электродинамики. Общий принцип относительности также нельзя рассматривать только как требование к способу математической формулировки законов физики. Физическое содержание его обусловлено свойствами гравитации. Согласно принципу эквивалентности, гравитационное поле относительно: его напряженность и строение

зависят от применяемой системы отсчета. Во всех системах, движущихся относительно друг друга без ускорений, существует одно и то же поле гравитации, тогда как в системах отсчета, движущихся с ускорениями, гравитационные поля различны.

Пусть  $S$ ,  $S'$  — две системы отсчета, одна из которых движется ускоренно относительно другой. Изучаемый физический процесс, протекающий в системе  $S$  в определенном поле тяготения, в  $S'$  происходит в другом поле. Если в системе  $S$  действие поля на данный процесс можно выразить общим законом, форма которого не зависит от величины напряженности и от конкретной структуры поля, то этот закон должен иметь такой же вид и в системе  $S'$ , поскольку переход от  $S$  к  $S'$  лишь изменяет поле гравитации.

Равноправность ускоренных систем отсчета по отношению к механическим движениям представляет собой следствие эквивалентности инерции и тяготения. Общий принцип относительности имеет более широкое значение, поскольку равноправность систем отсчета, установленная для механических процессов, переносится на все физические явления. Таким образом, принцип эквивалентности является необходимой предпосылкой и составной частью общего принципа относительности. Эйнштейн неоднократно подчеркивал, что первый из них содержится во втором.

При изложении ОТО общий принцип относительности обыкновенно отождествляют с условием ковариантности, т. е. с требованием выражать законы физики уравнениями, инвариантными относительно общего преобразования координат. В связи с этим в литературе неоднократно указывалось, что общий принцип относительности не является физическим законом и представляет собой чисто формальное требование к математическому выражению физических законов, применявшееся и в дорелятивистской физике. С этой точкой зрения, высказанной впервые, по-видимому, еще Кречманом в 1917 г. [13], едва ли можно согласиться, поскольку условие ковариантности связано, как мы видели, с гипотезой об эквивалентности инерции и гравитации.

Отдельные авторы приписывали понятию относительности два различных значения: физическое и логическое, или математическое. Понятие физической относительности предполагает существование данного физического процесса в различных системах отсчета, тогда как в математическом смысле относительность сводится к сохранению формы закона этого процесса (выраженного обыкновенно соответствующим дифференциальным уравнением) при преобразовании координат, т. е. при переходе от одной системы отсчета к другой.

В первом смысле справедливость принципа относительности для инерциальных систем отсчета (т. е. в рамках СТО) не вызывает сомнений: внутри лабораторий, движущихся относительно друг друга

равномерно и прямолинейно, все явления происходят одинаково. Для неинерциальных систем отсчета принцип относительности в физическом смысле подвергается сомнению или даже отвергается; для них допускается лишь логическая относительность, которая выполняется всегда, даже в том случае, когда физической относительности нет. Отсюда следует, что разработанная Эйнштейном теория, отвечающая условию ковариантности, не должна рассматриваться как обобщение СТО и не заслуживает названия общей теории относительности, поскольку общей относительности как физического закона не существует.

Изложенная концепция значительно отличается от точки зрения Эйнштейна. Представляется неправильным противопоставлять физическую относительность логической, так как вторая является математическим выражением (хотя и не всегда достаточно полным) первой.

Основываясь на принципе эквивалентности, можно рассмотреть некоторые конкретные физические процессы, осуществимые внутри ускоренно движущихся лабораторий и протекающие по одинаковым законам. Так, маятники, установленные в земной лаборатории и в космическом корабле, колеблются по общему закону с периодами, зависящими от напряженности соответствующих гравитационных полей. В земной лаборатории напряженность поля определяется притяжением Земли и ее вращением, а в космическом корабле — притяжением окружающих небесных тел, собственным полем корабля и законом его движения. На искусственном спутнике Земли, движущемся с выключенными двигателями, колебания маятника зависят только от собственного поля тяготения спутника и от его вращения.

Эквивалентность инерции и гравитации определяет принципиальную возможность осуществить любой *механический процесс* внутри лаборатории, движущейся по произвольному закону. Распространение этой возможности на *все физические процессы* является гипотезой, выраженной в постулате о равноправности всех ускоренных систем отсчета.

Итак, общий принцип относительности вместе с содержащейся в нем гипотезой о единой природе инерции и тяготения имеет в ОТО первостепенное значение. Последовательное применение его определило пути расширения СТО, указало на необходимость привлечения римановой геометрии и привело к идее о слиянии гравитации с метрикой пространственно-временного континуума.

**4. Тензор энергии-импульса.** В случае кинематического поля гравитации пространственно-временной континуум имеет евклидову метрику и допускает введение галилеевых координат, в которых основная квадратическая форма (5,1,5) принимает вид (5,1,2), соответствующий миру Минковского СТО. Если же поле гравитации