

странены на большие расстояния и промежутки времени, а свободно падающие системы отсчета являются чисто локальными. Обратно, наличие гравитационного поля вызывает такие явления в инерциальной системе отсчета, которые локально неотличимы от инерциального ускорения, которое можно было бы наблюдать в неинерциальной системе отсчета. Следовательно, существование инерциальных систем отсчета в нашей Вселенной, наполненной тяготеющими массами, должно быть выведено из комплекса экспериментальных процедур, которые могут быть основаны на использовании хорошо видимых, но достаточно удаленных объектов, не испытывающих ускорения, процедур, которые, кроме того, компенсируют искривление световых лучей, неизбежное при наличии больших масс.

По всей вероятности, такая экспериментальная программа в принципе неосуществима. Процедуры, предназначенные для выявления инерциальной системы отсчета в неограниченной области пространства и на неограниченно длительный промежуток времени, далеко не однозначны, причем не видно способов сделать их однозначными. Вместе с тем такая неоднозначность приводит к столь незначительной разнице в результатах, что в практической астрономии все эти различия перекрываются обычными ошибками наблюдений.

Эйнштейн высказался за отказ от любых попыток восстановить прежнюю роль инерциальных систем отсчета. Локально их роль должна быть передана свободно падающим системам отсчета; однако эти системы нельзя неограниченно продолжать. Среди систем отсчета, которые допускают продолжение, не может быть никакой иерархии; не существует критерия для выделения класса специальных или привилегированных систем отсчета. Все системы отсчета следует рассматривать как равноправные.

10. Принцип общей ковариантности

На языке четырехмерной геометрии система отсчета представляет собой (*четырёхмерную координатную систему*). Согласно Эйнштейну для формулирования законов природы геометрию пространства-времени вовсе не обязательно связывать с выбором специального класса

координатных систем; напротив, все достаточно непрерывные и гладкие координатные системы приемлемы в равной мере. Этот чисто формальный принцип известен как *принцип общей ковариантности*. Следствием этого принципа является требование, чтобы законы природы записывались во всех координатных системах в одной и той же форме. В частности, не может быть и речи о разделении координатных систем на системы с прямолинейными осями и системы с криволинейными осями *). Если поля тяготения нет, прямолинейные координатные системы — инерциальные системы отсчета — существуют; но такую ситуацию следует признать исключительной. Обычно поля тяготения существуют повсюду, хотя в межгалактическом пространстве они крайне слабы. В пространстве-времени может не быть кривых, которые обладали бы всеми свойствами прямых линий.

Смысл введения любой координатной системы — прямолинейной или криволинейной — состоит в том, чтобы маркировать мировые точки, т. е. события, достаточно локализованные в пространстве и времени, заданием набора четырех чисел. Если невозможно построить прямолинейные координатные системы, четырехмерный пространственно-временной континуум должен быть *искривленным*. Его кривизна представляет собой геометрический двойник полей тяготения, которые всегда неоднородны. В отсутствие гравитационных полей пространство-время плоское и мир Минковского оказывается правильным геометрическим построением. Но когда есть поля тяготения, геометрия Минковского недостаточно гибка: она должна быть несколько изменена с тем, чтобы допустить возможность искривленных многообразий. (Термин *многообразие* введен здесь для обозначения четырехмерного пространственно-временного континуума, который совсем не обязательно должен быть плоским.)

То, что пространство-время искривлено, ни в коей мере не противоречит представлению о свободно падающей системе отсчета. Говоря геометрическим языком, свободно падающая система отсчета представляет собой

*) Для тех, кто знаком с построением криволинейных систем координат, ясно, что автор под «осями» подразумевает координатные линии. (Прим. перев.)

локальную координатную систему, определенную только в непосредственной окрестности данной мировой точки; координатные оси такой системы — почти прямые линии, перпендикулярные друг другу; это вполне согласуется с наличием кривизны пространства-времени во всех мировых точках.

Гравитационные поля всегда неоднородны; напряженность поля и вызываемое полем ускорение изменяются при переходе от точки к точке. Именно по этим причинам свободно падающая система отсчета не может быть продолжена неограниченно. Если построить свободно падающую систему отсчета около поверхности Земли, такую систему отсчета можно продолжить на сравнительно большую область, прежде чем появятся какие-либо трудности. Если же, распространяя эту систему отсчета, мы дойдем до таких областей пространства, где неоднородность поля тяготения делается заметной, то в удаленных точках система либо перестает быть свободно падающей системой, либо оказывается непрямолинейной. Расстояния, о которых идет речь, могут достигать нескольких сотен километров. (Их величина определяется требуемой точностью измерений; более точные оценки вы найдете в следующем пункте.)

В искривленном пространстве-времени не существует, таким образом, системы отсчета, которая оказалась бы повсюду инерциальной или повсюду прямолинейной координатной системой. Свободно падающая система отсчета представляет собой координатную систему, осями которой являются геодезические линии, но лишь в малой окрестности мировой точки. Продолжение такой системы отсчета за указанную область приводит к тому, что система отсчета уже ничем не отличается от любой другой криволинейной координатной системы; в искривленном многообразии любая достаточно гладкая (хотя и криволинейная) координатная система столь же приемлема, как и остальные.

Искривленные многообразия обладают определенными геометрическими свойствами, не имеющими никакого отношения к выбору координатной системы. Пространственно-временным многообразиям можно сопоставить в каждой точке двойной конус светоподобных направлений, одна половина которых направлена в будущее, а вторая — в прошлое. *Кривизна* многообразия сама

по себе выражается через изменение направления вектора, возникающее при параллельном переносе вектора по небольшому замкнутому контуру. Изменение направления вектора зависит от исходного направления вектора, а также от ориентации двумерной поверхности, в которой расположен этот замкнутый контур; при заданной ориентации изменение направления вектора пропорционально площади, охватываемой замкнутым контуром. Следовательно, численное значение кривизны многообразия можно выразить через изменение направления вектора (в градусах) на единицу площади, охватываемой замкнутым контуром, по которому совершается обход.

Все эти, а также другие свойства многообразий могут быть описаны в любой координатной системе. Форма этого описания по понятным причинам меняется при переходе от одной координатной системы к другой. Координатные системы отличаются одна от другой тем, что заданная пространственно-временная точка в различных координатных системах маркируется различными численными значениями координат. Например, каждая отдельная компонента тензора кривизны может меняться при переходе от точки к точке. (Компоненты кривизны определяются различными комбинациями исходного направления вектора, его изменением по разным направлениям и ориентацией поверхности, в которой лежит замкнутый контур. При четырех измерениях таких независимых компонент оказывается двадцать). Если мы хотим найти такое изменение, конкретное описание зависит от частной идентификации каждой точки (т. е. от выбора координатной системы) в той же мере, в какой оно зависит от направления вектора и ориентации замкнутого контура. Что касается описания направления и ориентации, то оно зависит от выбора направления координатных осей.

Но если описание конкретного многообразия и его геометрии будет меняться в зависимости от выбора координатной системы, некоторые соотношения между геометрическими параметрами могут сохранять свой вид в любой координатной системе. Про такие соотношения между геометрическими параметрами говорят, что они *ковариантны*. Многообразия, в которых во всех точках выполняется какое-либо соотношение такого типа, образуют отдельный класс, выделяемый (по этому признаку)

из всех остальных многообразий. Плоские многообразия образуют такой отдельный класс, в котором все компоненты кривизны обращаются в нуль по всему многообразию. Обращение всех компонент кривизны может быть описано определенным математическим уравнением, которое сохраняет свой вид во всех координатных системах; плоские многообразия допускают построение координатных систем специального вида — прямолинейных координатных систем. Хотя есть преимущество в использовании прямолинейных координат, особенности плоских многообразий все же не зависят от такого выбора координат.

Согласно Эйнштейну, плоские пространственно-временные многообразия реализуются тогда, когда полностью отсутствует гравитационное поле; как класс многообразий плоские многообразия вряд ли могут служить основанием для теории тяготения. Такую роль должен играть другой класс многообразий. Принцип общей ковариантности подразумевает, что этот класс таков, что он не приводит к привилегированному или специальному классу координатных систем. Скорее геометрические соотношения, характеризующие эти многообразия, должны быть такими, что они сохраняют свою форму во всех допустимых координатных системах, так что они не могут быть упрощены в каких-то избранных системах отсчета.

Считая правильным принцип общей ковариантности, мы резко ограничиваем набор потенциальных математических (точнее геометрических) соотношений, которые можно было бы рассматривать как выражение закона тяготения. С другой стороны, релятивистские законы тяготения должны приводить к законам тяготения Ньютона в предельном случае, когда поля тяготения относительно слабы (массы источников поля не слишком велики), а относительные скорости как источников полей, так и объектов гравитационного взаимодействия малы по сравнению со скоростью света. Именно этих двух требований,— во-первых, что теория должна удовлетворять условию общей ковариантности, и, во-вторых, что она должна при надлежащих условиях переходить в ньютоновскую теорию,— вполне достаточно, чтобы устранить все неопределенности и установить единственно возможный закон тяготения. Это и было сделано в общей теории относительности, которую Эйнштейн опубликовал в 1916 г.