

В самом деле, с точки зрения локально галилеевых координат можно считать  $\Gamma_{ij}^k$  равными нулю, и мы возвращаемся практически к псевдоевклидову пространству специальной теории относительности. Тогда в пределах нашей локально галилеевой координатной системы геодезические принимают вид прямых, в частности, изотропные геодезические—вид изотропных прямых, которые и служат четырехмерными траекториями световых лучей, а это вполне согласуется с положением вещей в специальной теории относительности.

Более глубоким обоснованием нашего утверждения мы здесь заниматься не можем.

### § 127. Основная идея общей теории относительности

Если мы находимся в локально галилеевой координатной системе, то геодезические линии практически принимают вид прямых, а следовательно, движение частиц под действием поля тяготения совершается с точки зрения этой координатной системы равномерно и прямолинейно; другими словами, движение в поле тяготения сводится к движению по инерции, так что поле тяготения по существу отсутствует. Однако если мы интересуемся такой областью пространства событий, в которой нельзя ввести локально галилеевых координат (или, хотя и можно, но нецелесообразно), то мы прибегаем к координатам  $x^i$ , лишь близким к галилеевым (§ 123). В них уже даже с практической точки зрения нельзя считать геодезические линии «прямыми» (т. е. задавать  $x^1, x^2, x^3$  линейными функциями  $x^0$ ), так как в дифференциальных уравнениях геодезических

$$\frac{d^2x^i}{d\sigma^2} + \Gamma_{jk}^i \frac{dx^j}{d\sigma} \frac{dx^k}{d\sigma} = 0 \quad (127.1)$$

уже нельзя считать  $\Gamma_{jk}^i = 0$ . Криволинейный характер геодезических означает нелинейную зависимость  $x^1, x^2, x^3$  от  $x^0$ , т. е. неравномерный и криволинейный характер движения частиц под влиянием поля тяготения. Таким образом, поле тяготения в этом случае фактически имеет место (не равно нулю).

Итак, поле тяготения, наблюдаемое относительно данной (близкой к галилеевой) координатной системы  $x^i$ , характеризуется поведением геодезических линий в координатах  $x^i$ . Говоря грубо, чем более геодезические линии отличаются при этом от «прямых», тем сильнее будет поле тяготения, наблюдаемое в данной системе отсчета. В разных координатных системах  $x^i$  уравнения геодезических будут иметь различный вид, а потому и поле тяготения будет выглядеть по-разному. Так, в неподвижно висящем лифте наблюдается такое же поле тяготения, как и на поверхности земли; в ускоренно

движущемся лифте поле тяготения будет иным; с точки зрения свободно падающего лифта оно совершенно исчезает. Однако было бы ошибочным утверждать, что поле тяготения целиком относительно и зависит лишь от выбора системы отсчета. Последнее верно лишь в искусственно ограниченных малых участках пространства событий, в которых можно перейти в локально галилеевы координаты и тем самым (практически) полностью устранить поле тяготения. В общем же случае нельзя уничтожить поле тяготения за счет подходящего выбора координатной системы.

Так, если мы рассматриваем поле тяготения Земли не в пределах малой области (какова, например, внутренность лифта), а в пределах, охватывающих весь земной шар, то никаким преобразованием координат (системы отсчета) нам не удастся его аннулировать. Здесь мы имеем дело с существенным, неустранимым полем тяготения, порожденным массой Земли, хотя в различных координатных системах это поле будет наблюдаться в различных (в известной мере) вариантах.

Ясно, что любая теория тяготения должна прежде всего установить, каким образом распределение масс порождает это реальное поле тяготения. Классическим ответом на этот вопрос является ньютонова теория, которая утверждает (правда, без всякого объяснения), что масса, сосредоточенная в точке, сообщает любой свободной частице ускорение по направлению к себе, пропорциональное величине этой массы и обратно пропорциональное квадрату расстояния. При этом коэффициент пропорциональности  $k$ —гравитационная константа— во всех случаях одинаков. Релятивистская теория тяготения не допускает столь же элементарной формулировки. Ее сущность состоит в следующем.

*С одной стороны, поле тяготения характеризуется, как мы видели, ходом четырехмерных геодезических в пространстве событий, причем геодезические могут быть найдены, конечно, исходя из псевдоримановой метрики этого пространства.*

*С другой стороны, распределение и движение масс, выражаемые тензором  $T^{ij}$ , связаны с нашей псевдоримановой метрикой (согласно второй основной гипотезе) формулой (125.4).*

*В результате тензор  $T^{ij}$ , т. е. распределение и движение масс через посредство псевдоримановой метрики пространства событий влияет на ход геодезических линий, т. е. на поле тяготения.*

В этом и заключается основная идея новой теории тяготения. При первом знакомстве она представляется весьма неопределенной и лишенной конкретного содержания. Однако мы вскоре увидим, что на ее основе при вполне естественных дополнительных предположениях можно производить точные численные расчеты.

Весьма важно правильное понимание идейного содержания общей теории относительности. Как уже отмечалось, наиболее существен-

ную роль играет в ней гипотеза (125.4) о связи между тензором энергии-импульса и геометрией псевдориманова пространства событий.

По существу эту гипотезу следует рассматривать (независимо от субъективных намерений ее автора А. Эйнштейна) как попытку конкретной математической разработки материалистического принципа, согласно которому пространство и время суть формы существования материи, а следовательно, должны рассматриваться в связи с ее остальными свойствами (в том числе в связи с распределением и движением энергии-импульса). Конечно, это не значит, что излагаемая здесь теория является последним словом в этом отношении. Скорее, наоборот, ее следует рассматривать именно как одну из попыток, за которыми по мере развития экспериментальных данных последует ряд других. Ясно лишь одно, что в будущем развитии науки пространственно-временная протяженность материи будет рассматриваться в неотрывной связи с ее другими, прежде всего механическими, свойствами.

Как уже упоминалось, физический смысл общей теории относительности сводится именно к созданию новой теории тяготения. Правда, сам автор теории А. Эйнштейн и ряд его последователей придерживаются иной точки зрения. Они считают, что общая теория относительности помимо этого (и в первую очередь) устанавливает принцип равноправия всех систем отсчета, т. е. всех координатных систем  $x^i$  в пространстве событий (наподобие того как в специальной теории относительности такое равноправие устанавливается для ортонормированных систем). С этой точкой зрения, однако, трудно согласиться, так как при этом равноправие систем отсчета с точки зрения формально-математического аппарата незаконно истолковывается как их равноправие и по физическому существу дела. Между тем нетрудно разработать математический аппарат, с точки зрения которого будут формально равноправны всевозможные системы отсчета *и в классической теории*; это не может, однако, устранить того факта, что одна из систем отсчета (покоящаяся) будет выделяться своими особыми физическими свойствами.

Аналогично этому и в общей теории относительности вовсе не все системы отсчета равноправны по своим физическим свойствам. Прежде всего выделяются локально галилеевы системы, в которых отсутствует поле тяготения. Но и тогда, когда в данной пространственно-временной области поле тяготения является неустранимым, обычно всегда можно указать системы отсчета, наиболее естественно и закономерно связанные с данным распределением масс и приводящие поле тяготения в основном к его «неустранимому остатку». Напротив, вполне произвольный выбор системы отсчета (например, быстро вращающийся) сказывается в появлении фантастически больших полей тяготения, которые исчезают при переходе к более

естественным системам отсчета. Следовательно, утверждение о равноправии всех систем отсчета следует рассматривать как формальное и по существу бессодержательное. В связи с этим приходится практически отличать реальное, неустранимое поле тяготения, вызванное распределением масс, от «фиктивного», вызванного неудачным выбором системы отсчета. Правда, мы в общем случае не умеем провести границу между ними, так как ведут они себя одинаково, но не исключено, что в каком-то смысле и это может быть достигнуто\*).

## § 128. Приближенная теория

Как известно, ньютонова теория тяготения с величайшей точностью объясняет движения небесных тел, и огромный опытный материал, накопленный в течение столетий, хорошо укладывается в ее рамки. Поэтому от новой теории тяготения мы должны прежде всего потребовать, чтобы она была не хуже старой, т. е. чтобы она приводила практически к тем же или почти тем же результатам, что и ньютонова теория. Мы увидим в этом параграфе, что дело именно так и обстоит: *в первом приближении новая теория тяготения приводит к ньютоновой теории*. Расхождение же между этими теориями оказывается чрезвычайно незначительным и в большинстве случаев находится за пределами опыта. Существует лишь ограниченное число экспериментов, при которых может быть фактически наблюденно и измерено то ничтожное отклонение от ньютоновой теории, к которому приводит новая теория тяготения. Эти эксперименты говорят в ее пользу.

Мы займемся теперь исследованием хода геодезических, т. е. изучением поля тяготения в некоторой координатной системе  $x^i$ , близкой к галилеевой. Метрика пространства событий будет иметь вид (123.2):

$$ds^2 = -dx^0{}^2 + dx^1{}^2 + dx^2{}^2 + dx^3{}^2 + \gamma_{ij} dx^i dx^j. \quad (128.1)$$

При этом согласно (123.5)

$$g_{ij} = \dot{g}_{ij} + \gamma_{ij}. \quad (128.2)$$

Мы будем считать, что величинами  $\gamma_{ij}$ ,  $\frac{\partial \gamma_{ij}}{\partial x^k}$ ,  $\frac{\partial^2 \gamma_{ij}}{\partial x^k \partial x^l}$  можно пренебрегать сравнительно с единицей; кроме того, мы считаем их малыми одного («первого») порядка, так что произведениями этих величин мы будем пренебрегать по сравнению с самими этими величинами.

\*) В качестве попытки в этом направлении см. книгу В. А. Фока, Теория пространства, времени и тяготения, 2-е изд., М., 1961.