ВВЕДЕНИЕ *)

С точки зрения геометрической, теория пространства и времени естественно разделяется на теорию однородного (галилеева) пространства и теорию неоднородного (риманова и эйнштейнова) пространства **).

Галилеево пространство максимально однородно. Это выражается в том, что в нем: (а) все точки и моменты времени равноправны, (б) все направления равноправны и (в) все инерциальные системы, движущиеся друг относительно друга прямолинейно и равномерно, равноправны (принцип относительности Галилея).

Однородность пространства и времени проявляется в наличии группы преобразований, оставляющих без изменения выражение для четырехмерного расстояния (интервала) между двумя точками. Выражение для интервала играет в теории пространства и времени большую роль, так как форма его непосредственно связана с формой основных законов физики, а именно закона движения свободной материальной точки и закона распространения фронта световой волны в свободном пространстве.

Перечисленные выше признаки (а), (б) и (в) однородности галилеева пространства связаны со следующими преобразованиями.

(а) Равноправию всех точек и моментов времени соответствует преобразование, состоящее в смещении начала координат и начала счета времени и содержащее четыре параметра (три начальные координаты и начальный момент времени).

(б) Равноправию всех направлений соответствует преобразование, состоящее в повороте координатных осей и содержащее три параметра (три угла).

---

*) Во Введении мы часто пользуемся терминами и понятиями, которые будут точнее определены только в дальнейшем тексте. Это представляет известную непоследовательность, без которой мы, однако, не могли обойтись, так как мы хотели уже во Введении дать понятие о нашей точке зрения на теорию, составляющую предмет этой книги. Впрочем, неудобство такого изложения смягчается тем, что, как мы надеемся, читатель, приступающий к чтению этой книги, уже имеет некоторое предварительное представление о ее предмете. Если же сказанное во Введении будет недостаточно понятным, лучше всего перечитать его еще раз после всей книги.

**) Мы будем часто говорить вместо „пространство и время" просто „пространство".

(в) Равноправию инерциальных систем соответствует преобразование, состоящее в переходе от данной системы отсчета к другой, движущейся прямолинейно и равномерно относительно данной; это преобразование содержит три параметра (три составляющие относительной скорости).

Самое общее преобразование содержит десять параметров. Это есть преобразование Лоренца.

Известно, что в пространстве n измерений группа преобразований, оставляющая без изменения выражение для квадрата расстояния между бесконечно близкими точками, может содержать не более $\frac{1}{2}n(n+1)$ параметров. Если существует группа, содержащая все $\frac{1}{2}n(n+1)$ параметров, то пространство является максимально однородным; это будет либо пространство постоянной кривизны, либо, если кривизна равна нулю, евклидово (или псевдо-евклидово) пространство.

В рассматриваемом нами случае пространства-времени число измерений равно четырем и, следовательно, наибольшее возможное число параметров равно десяти. Так как последнее число совпадает с числом параметров в преобразовании Лоренца, то галилеево пространство (к которому это преобразование относится) и является, как мы уже говорили, максимально однородным.

Основанную на преобразованиях Лоренца теорию галилеева пространства принято называть частной теорией относительности. Точнее можно сказать, что предметом этой теории является формулировка физических законов в соответствии со свойствами галилеева пространства. Основоположником теории относительности является Альберт Эйнштейн (1879—1955). Предшественниками Эйнштейна следует считать Пуанкаре и Лоренца. В этой книге теории галилеева пространства будут посвящены главы I—IV.

Всемирное тяготение не может быть уложено в рамки однородного галилеева пространства. Более глубокая причина этого была выяснена Эйнштейном: она состоит в том, что не только инертная, но и тяжелая масса тела зависит от его энергии.

Теорию всемирного тяготения оказалось возможным создать на основе отказа от однородности пространства в целом*) и признания

---

*) Термины „пространство в целом", „условия на бесконечности" и т. п. употребляются нами не в буквальном, а в математическом смысле, принятом в теории поля. Под пространством в целом мы разумеем область, достаточно большую, чтобы на ее границах поле от рассматриваемой системы тел было пренебрежимо мало; к границам этой области и относятся „условия на бесконечности". В зависимости от характера задачи фактические размеры этой области могут быть весьма различными: для атома или молекулы можно считать бесконечно большими расстояния порядка микрона, для Солнечной системы — порядка светового года, для системы галактик — сотни миллионов световых лет. Но никогда мы не разумеем под „пространством в целом" всю Вселенную; вводить в рассмотрение всю Вселенную представляется нам невозможным по гносеологическим соображениям.

за ним известного рода однородности только в бесконечно малом. Математически этому соответствует отказ от евклидовой (точнее, псевдо-евклидовой) геометрии и введение геометрии Римана. Современная теория тяготения также была создана Эйнштейном.

То, что, согласно теории тяготения, в бесконечно малом все же имеет место однородность, подобная той, какая выражается преобразованиями Лоренца, связано с возможностью имитировать, вблизи данной точки и в данный момент времени, поле тяготения полем ускорения (принцип эквивалентности). Физической основой этого является известный еще Галилею закон, согласно которому все тела падают, при отсутствии сопротивления среды, с одинаковой скоростью (точнее, с одинаковым ускорением). В обобщенном виде закон Галилея может быть формулирован, как закон равенства массы инертной и массы весомой. Следует подчеркнуть, что этот фундаментальный закон имеет общий характер, тогда как принцип эквивалентности строго локален, а при не-локальном его применении он становится неточным и справедливым только для слабых полей и для медленных движений.

При изучении пространства и времени нельзя, однако, ограничиться локальным рассмотрением (т. е. рассмотрением бесконечно малых областей пространства и промежутков времени). Необходимо так или иначе характеризовать свойства пространства в целом: в противном случае вообще нельзя поставить задачу однозначным образом. Это особенно ясно из того факта, что уравнения всякого поля (также и поля тяготения) представляют уравнения в частных производных, решения которых получаются однозначно лишь при наличии начальных и предельных условий или условий, их заменяющих. Уравнения поля и предельные условия неразрывно связаны друг с другом, и последние никак нельзя считать чем-то менее важным, чем самые уравнения. Но в задачах, относящихся ко всему пространству, предельные условия относятся к отдаленным областям пространства и для их формулировки необходимо знать свойства пространства в целом.

Заметим, что недостаточность локального рассмотрения и важность предельных условий были явно недооценены Эйнштейном, в связи с чем в наших работах и в настоящей книге нам пришлось внести в постановку основных задач теории тяготения существенные изменения.

Наиболее простым и вместе с тем наиболее важным случаем является тот, когда можно предположить пространство однородным (в смысле преобразования Лоренца) на бесконечности. В этом случае вызываемые массами неоднородности будут иметь местный характер; массы с их полями тяготения будут как бы погружены в неограниченное галилеево пространство. Этот случай особенно важен потому, что существование интегралов движения связано с однородностью пространства на бесконечности. Только если пространство на бесконечности допускает полное преобразование Лоренца с десятью параметрами, существуют все десять интегралов движения, включая интеграл энергии.

Главы V, VI и VII этой книги почти целиком посвящены случаю пространства, однородного на бесконечности.

Возможно также предположение, что пространство-время в целом обладает не полной однородностью, а только частичной: попрежнему допустимы произвольный перенос начала пространственных координат и произвольный поворот пространственных осей, что дает шесть параметров, остальные же четыре параметра преобразования Лоренца, а именно три составляющие скорости и начало счета времени, определяются через первые шесть. Такое пространство-время было впервые рассмотрено Фридманом, а так как пространственная часть его обладает геометрией Лобачевского, то его можно назвать пространством Фридмана — Лобачевского. В отличие от пространства Галилея, это пространство допускает существование определенного поля тяготения при средней плотности весомой материи, отличной от нуля. Поэтому можно предположить, что в космологии, при рассмотрении огромных областей размерами в сотни миллионов световых лет, приблизительно равномерно заполненных галактиками, пространство Фридмана — Лобачевского является лучшим приближением к действительности, чем пространство Галилея. Теория местных неоднородностей в пространстве Фридмана — Лобачевского еще совершенно не разработана, и мы посвящаем этому пространству только §§ 94 и 95 этой книги.

В зависимости от свойств пространства в целом решается и вопрос о существовании привилегированной системы координат.

В галилеевом пространстве привилегированными являются обычные декартовы координаты и время; совокупность этих переменных носит название галилеевых координат. Привилегированное положение этих координат основано на том, что преобразования Лоренца, выражающие однородность пространства, будут в этих координатах линейными.

В случае пространства, однородного только на бесконечности, также оказывается возможным ввести привилегированную систему координат, определяемую с точностью до преобразования Лоренца (гармонические координаты). Этот факт, впервые установленный в наших работах, имеет большое принципиальное значение; только опираясь на него, можно показать, что привилегированное положение гелиоцентрической системы Коперника по сравнению с геоцентрической системой Птоломея сохраняется и в теории тяготения Эйнштейна. Более подробное обоснование его дано в §§ 92 и 93 этой книги. Все рассмотренные в этой книге конкретные задачи теории тяготения решаются нами в гармонических координатах. Этим достигается однозначность решения.

В пространстве Фридмана—Лобачевского, вероятно, тоже существуют привилегированные системы координат. Вопрос этот, однако, не исследован, поскольку еще не создана теория местной неоднородности в таком пространстве.

В вопросе о существовании привилегированных систем координат создатель теории тяготения Эйнштейн придерживался точки зрения, противоположной нашей, а именно, он отрицал существование таких систем. Это связано с отмеченной выше переоценкой лежащего в основе римановой геометрии локального способа рассмотрения свойств пространства и недооценкой важности рассмотрения пространства в целом. Несомненно, что здесь сыграла роль также философская позиция Эйнштейна, всю свою жизнь находившегося под влиянием идей Маха.

Вопрос о различных координатных системах и об изменении вида уравнений при переходе от одной координатной системы к другой занимает в теории пространства и времени важное место.

Особенно большое значение принято придавать ковариантности уравнений. Под ковариантностью разумеется следующее. Рассмотрим преобразование кооординат, сопровождаемое преобразованием зависимых переменных (функций) по определенному (например, тензорному) правилу и обратим внимание на вид уравнений, которым удовлетворяют первоначальные и преобразованные функции. Если полученные в результате такого преобразования новые функции от новых переменных удовлетворяют уравнениям того же вида, как старые функции от старых переменных, то уравнения называются ковариантными. Ковариантность уравнений позволяет писать их, не предрешая выбора координатной системы. Кроме того, требование ковариантности уравнений имеет большое эвристическое значение, так как ограничивает разнообразие формы уравнений и, тем самым, помогает отобрать из них правильные. Необходимо, однако, подчеркнуть, что это ограничение имеет место при обязательном условии, что ограничивается также и число вводимых функций; если же допустить введение любого числа новых вспомогательных функций, то практически любым уравнениям можно придать ковариантную форму.

Таким образом, сама по себе ковариантность уравнений отнюдь не является выражением какого-либо физического закона. Так, например, в механике системы материальных точек уравнения Лагранжа 2-го рода являются ковариантными по отношению к любым преобразованиям координат, хотя и не выражают никакого нового физического закона по сравнению, например, с уравнениями Лагранжа 1-го рода, которые пишутся в прямоугольных координатах и ковариантными не являются.

В случае уравнений Лагранжа ковариантность достигнута путем введения, в качестве новых вспомогательных функций, коэффициентов квадратичного выражения для функции Лагранжа через скорости.

В геометрии Римана новыми вспомогательными функциями являются коэффициенты $g_{\mu\nu}$ квадратичного выражения для квадрата бесконечно малого расстояния. Введение этих функций позволяет составлять выражения, ковариантные по отношению к любым преобразованиям координат. Само по себе это не дает ничего нового. Но требование, чтобы эти ковариантные выражения уже никаких дальнейших функций, кроме самих $g_{\mu\nu}$, не содержали, настолько сильно их ограничивает, что приводит почти однозначно к найденным Эйнштейном уравнениям гравитационного поля.

Выяснив смысл понятия ковариантности в применении к геометрии Римана, сопоставим его с рассмотренным ранее понятием однородности пространства.

Как мы указывали выше, свойство однородности галилеева пространства проявляется в преобразованиях, оставляющих без изменения выражение для четырехмерного расстояния между двумя точками. Подробнее можно сказать, что в этих преобразованиях остаются без изменения коэффициенты этого выражения, т. е. величины $g_{\mu\nu}$. В общем же случае геометрии Римана преобразований, оставляющих без изменения величины $g_{\mu\nu}$, не существует, ибо пространство Римана не однородно. В геометрии Римана речь идет о преобразованиях координат, *сопровождаемых преобразованиями величин* $g_{\mu\nu}$, а такого рода совместные преобразования, равно как и ковариантность по отношению к ним, никакого отношения к однородности или неоднородности пространства не имеют *).

Теперь мы уже можем перейти к выяснению тех недоразумений, которые связаны с укоренившимся в литературе неправильным употреблением слова „относительность".

В первых работах по теории относительности понятие относительности связывалось с понятием однородности пространства. Теорией относительности называлась теория галилеева пространства, однородность которого характеризуется преобразованиями Лоренца. Название это можно считать в известной мере оправданным, поскольку большую роль в теории играет обобщение принципа относительности Галилея.

Однако с созданием теории тяготения Эйнштейна вошел в употребление термин „общая относительность", который все запутал. Термин этот стал применяться в смысле „общей ковариантности" (т. е. в смысле ковариантности уравнений по отношению к произвольным преобразованиям координат, сопровождаемым преобразованием величин $g_{\mu\nu}$). Но мы видели, что такая ковариантность ничего не имеет общего с однородностью пространства, а это значит, что „общая относительность" ничего не имеет общего с „относительностью просто". Между тем эта последняя получила название „частной", которое как бы указывает, что она является частным случаем „общей".

---

*) Эти идеи высказывались Э. Картаном [1].

Чтобы дать понятие о том, к каким недоразумениям это приводит, рассмотрим ряд примеров.

Как будет показано в главе IV, теория однородного галилеева пространства может быть формулирована не только в виде, ковариантном в смысле преобразований Лоренца, но и в общековариантном виде. На языке „общей“ и „частной“ относительности выразить эту простую мысль крайне затруднительно, и мы это делать не беремся, так как нам пришлось бы сказать, что „частная“ относительность заключает в себе „общую“ или что-нибудь в таком роде.

Если вспомнить, что уже в ньютоновой механике мы имеем дело с общековариантными уравнениями Лагранжа 2-го рода, то пришлось бы также сказать, что и ньютонова механика содержит в себе „общую относительность“.

Термин „общая относительность“ или „общий принцип относительности“ употребляется (прежде всего, самим Эйнштейном) еще и в смысле теории тяготения. Уже основная работа Эйнштейна по теории тяготения (1916 г.) озаглавлена: „Основы общей теории относительности“. Это еще больше запутывает дело. Так как в теории тяготения пространство предполагается неоднородным, а относительность связана с однородностью, то выходит, что в общей теории относительности нет никакой относительности. Если даже учитывать, что в теории тяготения пространство однородно в бесконечно малом, то и тогда придется признать, что теория тяготения несет с собой ограничение, а не обобщение понятия относительности, поскольку она отказывается от галилеева пространства, однородного не только в бесконечно малом, но и в целом.

Сказанного достаточно, чтобы стало ясно, что употребление терминов „общая относительность“, „общая теория относительности“ или „общий принцип относительности“ недопустимо. Оно не только приводит к недоразумениям, но и отражает неправильное понимание самой теории. Как это ни парадоксально, такое непонимание проявил сам автор теории Эйнштейн, который как в названии своей теории и своих сочинений, так и в своих рассуждениях подчеркивал слова „общая относительность“ и не видел, что созданная им новая теория, если ее рассматривать как обобщение старой, содержит обобщение не понятия относительности, но других понятий, а именно геометрических.

В настоящей книге мы термина „общая относительность“ не употребляем. Теорию галилеева пространства мы называем также, следуя установившемуся обычаю, теорией относительности (но без прибавления слова „частная“). Теорию эйнштейнова пространства мы называем теорией тяготения (но не „общей теорией относительности“, поскольку такое название, как мы видели, смысла не имеет).

Общефилософская сторона наших взглядов на теорию пространства, времени и тяготения сложилась под влиянием философии диалектического материализма, в особенности же под влиянием книги Ленина „Материализм и эмпириокритицизм". Учение диалектического материализма помогло нам критически подойти к точке зрения Эйнштейна на созданную им теорию и заново ее осмыслить. Оно помогло нам также правильно понять и истолковать полученные нами новые результаты. Мы хотели бы здесь это констатировать, хотя в явной форме философские вопросы в этой книге и не затрагиваются.