

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ И ПРОБЛЕМА ПРОСТРАНСТВА *

Характерной особенностью ньютоновской физики является то, что она пространству и времени, так же как и материи, должна приписывать независимое реальное существование, поскольку в ньютоновском законе движения появляется понятие ускорения. Но ускорение в этой теории может означать только «ускорение по отношению к пространству». Таким образом, ньютоново пространство должно мыслиться как «покоящееся» или, по крайней мере, как «неускоренное», чтобы ускорение, появляющееся в законе движения, можно было рассматривать как величину, имеющую физический смысл. Почти то же самое справедливо и для времени, которое также входит в определение понятия ускорения. Сам Ньютон и наиболее критически настроенные его современники чувствовали, что это не позволяет считать физической реальностью как само пространство, так и состояние движения последнего; но в то время не было другого выбора, если хотели, чтобы механика имела ясный смысл.

Приписание физической реальности пространству вообще и, особенно, пустому пространству — в самом деле требование слишком жестокое. Философы с давних времен всегда сопротивлялись такому требованию.

* *Relativität und Raumproblem*. Приложение V к немецкому изданию 1954 года книги «О специальной и общей теории относительности» (статья 43, том 1). (Впервые опубликовано в 15-м английском издании этой книги в 1952 году.—*Ред.*) В предисловии (9 июня 1952 г.) к этому изданию Эйнштейн пишет: «В этом издании я добавил Приложение V, в котором изложил свои взгляды на проблему пространства вообще и на изменения наших представлений о пространстве, возникающие под влиянием релятивистской точки зрения. Мне хотелось показать, что пространству и времени нельзя с необходимостью приписать раздельное существование, независимо от действительных объектов физической реальности. Физические объекты находятся не в пространстве, но эти объекты являются пространственно протяженными. На этом пути концепция „пустого пространства“ теряет свой смысл».

Декарт аргументировал это примерно так: пространство совпадает с протяженностью, а протяженность связана с телами; таким образом, нет пространства без тел и, следовательно, нет пустого пространства. Слабость этой аргументации заключается главным образом в следующем. Несомненно верно, что понятие протяженности обязано своим происхождением нашему опыту в расположении твердых тел в пространстве. Отсюда, однако, нельзя заключить, что понятие протяженности не может быть оправдано и в других случаях. Такое расширение понятий может быть обосновано косвенно по его значению для интерпретации эмпирических результатов. Поэтому утверждение, что протяженность обязательно связана с телами, очевидно, само по себе необоснованно. Однако позже мы увидим, что общая теория относительности подтверждает все же концепцию Декарта, хотя и другим путем. Декарта привело к его удивительно привлекательной точке зрения сознание того, что без настоятельной необходимости не следует приписывать реальность вещам, подобным пространству, которые не допускают «прямой проверки на опыте»¹.

Психологическое происхождение идеи пространства или необходимости ее далеко не так очевидно, как может показаться на основе привычного нам образа мышления. Геометры прошлого имели дело с мысленными объектами (прямая, точка, поверхность), но не с пространством как таковым, которое понадобилось позже, в аналитической геометрии. Однако идея пространства подсказывалась некоторыми простыми опытами. Допустим, что сделан ящик. Внутри ящика так разместим предметы, чтобы он был целиком заполнен. Возможность такого размещения предметов есть свойство материального объекта — «ящика», то, что с ним связано, — «ограниченное пространство». Это — нечто различное для разных ящиков, что можно естественно представить себе, независимо от того, имеются вообще какие-либо предметы в ящике в любой момент времени или нет. Когда в ящике нет предметов, его пространство «пустое».

До сих пор наше представление о пространстве связывалось с ящиком. Однако оказывается, что все возможные способы размещения, которые определяют пространство-ящик, не зависят от толщины стенок ящика. Нельзя ли тогда сделать эту толщину равной нулю, не теряя, однако, «пространства»? Естественность такого предельного процесса очевидна, и для нашего воображения пространство без ящика — вещь очевидная; она тем не менее становится нереальной, как только мы забываем происхождение этого понятия. Можно думать, что Декарт считал его несовместимым с представлениями о пространстве как о независимой от материальных объектов вещи, которая может существовать

¹ Это выражение не следует понимать слишком буквально.

в отсутствие материи². (В то же самое время, это не мешало ему трактовать пространство как фундаментальное понятие его аналитической геометрии.) Ссылка на вакуум в ртутном барометре, конечно, обезоружила картезианцев. Но нельзя отрицать, что уже на этой примитивной стадии пространство понималось как самостоятельно существующий реальный объект.

Способы, которыми тела могут заполнять пространство (например, ящик), представляют собой предмет трехмерной эвклидовой геометрии; ее аксиоматическая структура, однако, легко вводит в заблуждение, так как она не подчеркивает, что геометрия не описывает реальные объекты.

Если теперь понятие пространства формируется намеченным выше образом и следует из опыта «заполнения» ящика, то это пространство прежде всего — *ограниченное* пространство. Однако это ограничение не представляется существенным, так как, очевидно, всегда можно ввести в рассмотрение ящик больших размеров, охватывающий ящик меньших размеров. На этом пути пространство представляется как нечто неограниченное.

Я не буду здесь рассматривать, как понятия трехмерности и «эвклидовости» пространства могут быть прослежены в сравнительно простых опытах. Прежде всего я буду рассматривать с других точек зрения роль понятия пространства в развитии физической мысли.

Если некоторый ящик s находится в состоянии относительного покоя, внутри некоторого ящика S больших размеров, то полость ящика s является частью полого пространства ящика S ; при этом одно и то же «пространство», которое содержат оба ящика, принадлежит каждому из них. Однако, если s движется относительно S , это понятие становится менее простым. Тогда были склонны думать, что ящик s охватывает всегда одно и то же пространство, но различные части пространства ящика S . В таком случае становилось необходимым выделить для каждого ящика его особое пространство, которое не мыслится ограниченным, и предположить, что эти два пространства находятся в движении по отношению друг к другу.

Прежде чем такой сложный вопрос был осознан, пространство представлялось неограниченной средой, или вместилищем, в котором плавают материальные объекты. Теперь же надо вспомнить, что существует бесконечное число пространств, которые движутся относительно друг друга.

² Попытку же Канта устранить это затруднение путем отрицания объективности пространства трудно считать серьезной. Возможность заполнения внутреннего пространства ящика так же объективна, как и сам ящик и как объект, который может быть помещен внутри него.

Понятие пространства как чего-то, существующего объективно и независимо от вещей, относится к донаучному мировоззрению; оно сменяется идеей о существовании бесконечного числа пространств, движущихся относительно друг друга. Эта последняя оказывается логически неизбежной, но и она не может играть значительную роль в научной мысли.

Что можно сказать о психологической природе понятия времени? Это понятие, несомненно, связано с фактом «запоминания», а также с дифференциацией чувственных ощущений и воспоминанием о них. Сомнительно, дает ли нам что-либо психологически дифференциация чувственного опыта и воспоминание (или просто изображение). Всякий знает по своему опыту, что он часто сомневался в том, испытывал ли он что-то действительно или просто вообразил себе это. Вероятно, способность различать между этими возможностями впервые приходит как результат упорядочивающей деятельности мышления.

«Запоминание» упорядочивает ощущения и позволяет рассматривать «более ранние переживания» в сравнении с «переживаниями в настоящее время». Этот понятный принцип упорядочения вспоминаемого опыта и возможность его выполнения имели своим результатом субъективное понятие времени, т. е. такое понятие времени, которое относится к упорядочению переживаний индивидуума.

Что мы имеем в виду, вводя объективное понятие времени? Рассмотрим следующий пример. Лицо *A* («я») испытало: «Молния!». В то же самое время лицо *A* также обнаружило такое поведение лица *B*, что сопоставило поведение лица *B* со своим собственным ощущением молнии. Таким образом, *A* связывает с *B* свое ощущение молнии. У лица *A* возникает представление, что другие лица также участвуют в опыте с молнией. «Молния!» теперь истолковывается уже не как некоторое исключительно субъективное переживание, но как опыт других лиц (или в конечном счете только как «потенциальный опыт»). Таким образом ощущение «Молния!», которое первоначально доходило до сознания как некоторый «опыт», теперь интерпретируется как некоторое (объективное) «событие». Это как раз и есть полная сумма всех событий, которую мы имеем в виду, когда говорим о «реальном внешнем мире».

Мы видели, что мы сами склонны приписывать упорядочение во времени наших переживаний следующим образом. Если β позже, чем α , и γ позже, чем β , то γ также позже, чем α («последовательность событий»). Как обстоит теперь дело в этом отношении с «событиями», которые мы ассоциируем с переживаниями? На первый взгляд представляется естественным предположить, что существует порядок следования событий во времени, который согласуется с временным порядком переживаний (ощущений). Вообще это делалось бессознательно до тех пор, пока

не стали возникать сомнения³. Чтобы прийти к идее объективного мира, необходимы еще дополнительные конструктивные понятия: событие локализовано не только во времени, но и в пространстве.

В предыдущих разделах⁴ мы пытались описать, как понятия пространства, времени и события психологически могут быть связаны с переживаниями. С логической точки зрения они представляют собой свободные творения человеческого разума, инструменты мышления, которые должны служить для установления связи одних ощущений с другими, так чтобы их можно было лучше обзирать. Попытка осознать эмпирические источники этих фундаментальных понятий должна показать, в какой мере мы фактически привязаны к этим понятиям. Мы отдаем себе отчет в свободе, разумное использование которой в случае необходимости всегда является трудным делом.

Мы должны еще добавить нечто существенное к этому наброску, касающемуся психологической природы понятий пространства — времени — события (будем называть их более кратко понятиями «пространственного типа» в отличие от этих понятий в психологической сфере). Мы связывали понятие пространства с ощущениями, используя ящики и размещение материальных объектов в них. Таким образом, это формирование понятий уже предполагает понятие материальных объектов (например, «ящичков»). Таким же образом лица, которые были введены в рассмотрение при обсуждении объективного понятия времени, тоже играют роль материальных объектов. Поэтому мне кажется, что формирование понятия материального объекта должно предшествовать нашим понятиям времени и пространства.

Все эти понятия пространственного типа, вместе с такими, как «боль», «цель», «намерение», и другими понятиями из области психологии, принадлежат к донаучным представлениям. Теперь для физического мышления, как и для естественнонаучного мышления вообще, характерно то, что оно в принципе стремится обойтись *только* понятиями «пространственного типа» и старается выразить с помощью их все соотношения, имеющие форму законов. Физик пытается свести цвета и тона к частотам колебаний, психолог — мышление и боль к нервным процессам, так что психический элемент как таковой исключается из причинной зависимости в природе и, таким образом, нигде не выступает как независимое звено в причинных связях. Эта позиция, с точки зрения которой для понимания всех связей возможно в принципе использовать исключительно

³ Например, порядок ощущений во времени, полученных акустическими средствами, может отличаться от временного порядка ощущений, полученных визуально, так что временная последовательность событий не может быть отождествлена с временной последовательностью ощущений.

⁴ См. статью 43 тома I. — *Прим. ред.*

понятия «пространственного типа», несомненно и есть то, что в настоящее время понимается под термином «материализм» (после того, как «материя» утратила свою роль фундаментального понятия).

Зачем понадобилось ниспровергать с платоновских олимпийских высот фундаментальные представления естественнонаучной мысли и пытаться обнаружить их земное происхождение? Ответ: для того, чтобы освободить эти идеи от привязанного к ним «табу» и, таким образом, достичь большей свободы в формировании представлений и понятий. В том, что эта критическая концепция была введена, бессмертная заслуга принадлежит прежде всего Д. Юму и Э. Маху.

Наука приняла от донаучного мышления понятия пространства, времени и материального объекта (с важным частным случаем «твердого тела»), а затем модифицировала и уточнила их. Ее первым значительным достижением было построение эвклидовой геометрии. Аксиоматическая формулировка последней не должна была заставлять нас закрывать глаза на ее эмпирическое происхождение (возможности размещения твердых тел), в особенности на трехмерную природу пространства, а также на его эвклидовский характер (т. е. возможность заполнить без пробелов пространство одинаковыми «кубами»).

Тонкость понятия пространства возросла с открытием того, что абсолютно твердых тел не существует. Все тела являются упруго деформируемыми и изменяют свой объем с изменением температуры. Поэтому структуры, возможные расположения которых должны описываться эвклидовой геометрией, не могут быть оторваны от физических понятий. Но так как физика при установлении своих понятий в конце концов должна использовать геометрию, то эмпирическое содержание геометрии может быть сформулировано и проверено на опыте только в рамках всей физики.

В этой связи необходимо также подумать об атомистике и ее концепции конечной делимости; пространство не может быть измерено до субатомных размеров. Атомистика заставляет также отказаться, в принципе, от резкой и статически определенной ограничивающей поверхности твердых тел. Строго говоря, не существует *точных* законов для возможных расположений твердых тел, касающихся друг друга, даже в макроскопической области.

Несмотря на это, никто не думал отказываться от понятия пространства, ибо оно представляется необходимым в замечательно оправдывающейся совокупности естественных наук. Мах в девятнадцатом столетии был единственным, кто серьезно думал об исключении понятия пространства, которое он пытался заменить представлением о всей сумме расстояний между всеми материальными точками. (Он предпринял эту попытку для того, чтобы прийти к удовлетворительному пониманию инерции).

Поле

В механике Ньютона пространство и время играют двойственную роль. Прежде всего они выполняют для объектов, встречающихся в физике, роль носителя или рамы, относительно которой события описываются с помощью пространственных координат и времени. В принципе, вещество мыслится состоящим из «материальных точек», движения которых образуют физическое событие. Если вещество мыслится непрерывным, то это делается лишь в тех случаях, когда не желают или не могут описывать его дискретную структуру. В этом случае малые части (элементы объема) материи трактуются подобно материальным точкам, по крайней мере до тех пор, пока мы интересуемся только движениями, но не явлениями, которые в данный момент нельзя или ненужно относить к движениям (например, изменения температуры, химические процессы). Вторая роль пространства и времени была та, что они служили «инерциальной системой». Из всех мыслимых систем отсчета инерциальные системы потому считались привилегированными, что по отношению к ним справедлив закон инерции.

При этом существенным обстоятельством является то, что «физическая реальность», существующая независимо от познающих ее субъектов, представлялась состоящей по крайней мере в принципе, из пространства и времени, с одной стороны, и из постоянно существующих материальных точек, движущихся по отношению к пространству и времени, — с другой. Идея независимого существования пространства и времени может быть выражена следующим образом: если бы материя исчезла, то остались бы только пространство и время (своего рода сцена, на которой разыгрываются физические явления).

Эта точка зрения была преодолена в результате возникновения новых идей, которые сначала, казалось, не вносили никаких изменений в проблему пространства — времени, а именно, в результате появления *понятия поля* и возникновения требования — заменить им, в принципе, понятие частицы. В рамках классической физики понятие поля появлялось как вспомогательное понятие в тех случаях, когда вещество трактовалось как некоторый континуум. Например, при рассмотрении теплопроводности в твердом теле состояние этого тела описывалось путем задания температуры в каждой точке тела для каждого определенного момента времени. Математически это означает, что температура T представляется как функция пространственных координат и времени t (поле температуры). Закон теплопроводности представляется как некоторое локальное соотношение (дифференциальное уравнение), которое охватывает все частные случаи передачи тепла. Температура здесь представляет собой простой пример понятия поля. Это — некоторая величина (или

некоторый комплекс величин), являющаяся функцией координат и времени. Другим примером может служить описание движения жидкости. В каждой точке и для любого момента времени существует скорость, которая количественно описывается ее тремя «компонентами» по осям системы координат (вектор). Здесь компоненты скорости в точке (поле компонент) также являются функциями координат (x, y, z) и времени (t) .

Характерной особенностью упомянутых здесь полей является то, что они выступают только в пределах весомых масс; они служат только для описания состояния вещества. На ранней стадии развития понятия поля считалось, что там, где нет вещества, не может существовать и поля. Однако в первой четверти девятнадцатого столетия было показано, что явления интерференции и распространения света могут быть объяснены с изумительной ясностью, если свет рассматривать как волновое поле, совершенно аналогичное полю механических колебаний в некотором упругом твердом теле. Таким образом, возникла необходимость ввести поле, которое могло бы существовать в пустом пространстве, в отсутствие весомой материи.

Это состояние проблемы привело к парадоксальной ситуации, так как по самой своей природе понятие поля возникло для описания состояний внутри весомых тел. Это казалось естественным, так как утвердилось убеждение, что каждое поле должно рассматриваться как некоторое состояние, допускающее механическую интерпретацию, что, конечно, предполагает присутствие вещества. Таким образом вынуждены были предположить существование всюду, даже в пространстве, которое прежде считалось пустым, некоторого рода материи, которая была названа «эфиром».

Эмансипация понятия поля от предположения о его связи с механическим носителем нашла отражение в психологически наиболее интересных процессах развития физической мысли. В течение второй половины XIX столетия, в связи с исследованиями Фарадея и Максвелла, становилось все более ясным, что полевое описание электромагнитных процессов значительно превосходит трактовку на основе механических концепций материальной точки. Введя понятия поля в электродинамику, Максвелл успешно предсказал существование электромагнитных волн, принципиальное тождество которых со световыми волнами, уже ввиду равенства их скорости распространения, не вызывало сомнений. В результате этого оптика в принципе была поглощена электродинамикой. *Один* психологический эффект этого огромного успеха состоял в том, что концепция поля, в противоположность механической картине классической физики, постепенно приобретала все бóльшую самостоятельность.

Тем не менее сначала допускали, что электромагнитные поля должны интерпретироваться как состояния эфира, и усердно пытались объяснить

эти состояния как механические. Но поскольку все усилия оказывались тщетными, в науке постепенно стали привыкать к идее отказа от такой механической интерпретации. Несмотря на это, все еще оставалось убеждение, что электромагнитные поля должны представлять собой состояния эфира; это продолжалось вплоть до начала XX столетия.

Эфирная теория повлекла за собой следующий вопрос: как ведет себя эфир с механической точки зрения по отношению к весомым телам? Принимает ли он участие в движении этих тел или его части остаются в покое относительно друг друга? Для решения этого вопроса было предпринято много остроумных экспериментов. В этой связи должны быть отмечены следующие важные факты: «абберрация» неподвижных звезд вследствие годичного движения Земли и «эфф́ект Допплера» (влияние относительного движения звезд на частоту излучаемого ими света, достигающего нас). Результаты всех этих наблюдений и опытов (за исключением одного, эксперимента Майкельсона — Морли) были объяснены Г. А. Лоренцом на основе предположения, что эфир не принимает участия в движениях весомых тел и что части эфира вообще не перемещаются относительно друг друга. Таким образом, эфир выступил как бы воплощением абсолютно покоящегося пространства. Но Лоренц достиг гораздо большего. Он объяснил все известные в то время электромагнитные и оптические процессы в весомых телах на основе предположения, что влияние весомой материи на электрическое поле, и обратно, обусловлено исключительно тем фактом, что составляющие материю частицы несут электрические заряды, которые участвуют в движении частиц. Что же касается эксперимента Майкельсона — Морли, то Г. А. Лоренц показал, что полученный результат по крайней мере не противоречит теории покоящегося эфира.

Несмотря на все эти замечательные успехи, состояние теории все еще не было полностью удовлетворительным по следующим причинам. Согласно классической механике, в справедливости которой, с высокой степенью точности, можно было бы не сомневаться, все инерциальные системы или инерциальные «пространства» эквивалентны для формулировки законов природы, т. е. законы природы инвариантны относительно перехода от одной инерциальной системы к другой. Электромагнитные и оптические эксперименты с высокой точностью говорили о том же. Но из основ электромагнитной теории следовало, что должно отдаваться предпочтение некоторой особой инерциальной системе отсчета, а именно системе, покоящейся относительно светового эфира. Такое понимание теоретических основ совершенно неудовлетворительно. Возник вопрос: нет ли модификаций этих основ, которые бы сохраняли, подобно классической механике, эквивалентность инерциальных систем (специальный принцип относительности)?

Ответом на этот вопрос явилась специальная теория относительности. Она приняла от теории Максвелла — Лоренца предположение о постоянстве скорости света в пустом пространстве. Чтобы согласовать это предположение с эквивалентностью инерциальных систем (специальный принцип относительности), необходимо было отказаться от идеи абсолютного характера одновременности; кроме того, для перехода от одной инерциальной системы к другой служили преобразования Лоренца для времени и пространственных координат. Все содержание специальной теории относительности заключено в постулате: законы природы инвариантны относительно преобразований Лоренца. Важное значение этого требования состоит в том, что оно определенным образом ограничивает возможные законы природы.

Каково отношение специальной теории относительности к проблеме пространства? В первую очередь мы должны предостеречь от того мнения, что четырехмерность реальности была введена впервые этой теорией. Даже в классической механике «положение» события определяется четырьмя числами: тремя пространственными координатами и одной временной координатой; таким образом, вся совокупность физических «событий» мыслится как бы погруженной в четырехмерное непрерывное многообразие (континуум). Но согласно с классической механикой этот четырехмерный континуум распадается объективно на одномерное временное и на трехмерное пространственное сечения, причем лишь последнее из них содержит одновременные события. Это «расщепление» является одним и тем же для всех инерциальных систем. Одновременность двух определенных событий по отношению к одной инерциальной системе влечет за собой одновременность этих событий по отношению ко всем инерциальным системам. Это есть то, что имеют в виду, когда говорят об абсолютном времени в классической механике. Согласно же специальной теории относительности это уже не так. Хотя по отношению к некоторой определенной инерциальной системе существует совокупность событий, одновременных с каким-либо наблюдаемым событием, эта совокупность уже не будет независимой от выбора инерциальной системы. Четырехмерный континуум не распадается объективно на сечения, среди которых были бы сечения, содержащие все одновременные события; для пространственно протяженного мира понятие «сейчас» теряет свой объективный смысл. В связи с этим пространство и время должны рассматриваться как объективно нераспадающийся четырехмерный континуум, если желают выразить содержание объективных отношений без ненужного произвола.

Тем, что специальная теория относительности показала физическую эквивалентность всех инерциальных систем, она доказала несостоятельность гипотезы покоящегося эфира. Поэтому необходимо было

отказаться от идеи, что электромагнитное поле должно рассматриваться как состояние некоторого материального носителя. Таким образом, поле становится несводимым элементом физического описания, несводимым в том же смысле, что и понятие материи в теории Ньютона.

До сих пор мы обсуждали вопрос о том, в какой мере понятия пространства и времени были *модифицированы* специальной теорией относительности. Теперь же сконцентрируем наше внимание на тех элементах, которые эта теория приняла от классической механики. В ней законы природы претендуют на справедливость только в том случае, когда в качестве основы пространственно-временного описания принята инерциальная система. Закон инерции и принцип постоянства скорости света справедливы только по отношению к *инерциальной системе*. Можно также требовать, чтобы законы поля имели физический смысл и были справедливы только по отношению к инерциальным системам. Таким образом, как и в классической механике, пространство здесь является независимой составной частью в представлении физической реальности. Если мы представим себе, что материя и поле удалены, то остается (инерциальное) пространство, или, точнее говоря, это пространство вместе со связанным с ним временем. Эта четырехмерная структура (пространство Минковского) мыслится как носитель материи и поля. Инерциальные пространства, вместе со связанными с ними временами, являются привилегированными четырехмерными координатными системами, связанными линейными преобразованиями Лоренца. Так как в этой четырехмерной структуре не существует каких-либо сечений, которые объективно представляли бы «сейчас», понятия события и становления не исключаются полностью, но усложняются. Поэтому представляется более естественным мыслить физическую реальность как четырехмерные события вместо *развития* событий трехмерных.

Это жесткое четырехмерное пространство специальной теории относительности есть до некоторой степени аналог неподвижного трехмерного эфира Г. А. Лоренца. Для этой теории справедливо также следующее утверждение: описание физических состояний постулирует пространство как заданное с самого начала и существующее независимо. Таким образом, даже эта теория не рассеяла беспокойства Декарта, связанного с независимым или, быть может, *априорно* существующим «пустым пространством». Действительная цель нашего обсуждения — показать, до какой степени эти сомнения преодолены общей теорией относительности.

Понятие пространства в общей теории относительности

Эта теория возникла первоначально из попытки понять равенство инертной и тяжелой масс. Мы исходим из инерциальной системы S_1 , пространство которой, с физической точки зрения, является пустым. Иными словами, в рассматриваемой части пространства не существует ни материя (в обычном смысле), ни поле (в смысле специальной теории относительности). Пусть по отношению к системе S_1 равноускоренно движется вторая система отсчета S_2 . Тогда система S_2 будет неинерциальной. По отношению к S_2 каждая пробная масса должна двигаться с ускорением, которое не зависит от ее физической и химической природы. Поэтому относительно S_2 существует картина, которую, по крайней мере в первом приближении, нельзя отличить от гравитационного поля. Таким образом, с наблюдаемыми фактами совместима следующая концепция: система S_2 эквивалентна некоторой «инерциальной системе», в отличие от S_1 , находящейся в (однородном) гравитационном поле (природой которого, в этой связи, не следует заниматься). Итак, когда в теорию введено гравитационное поле, инерциальная система теряет свое объективное значение, если предположить, что такой «принцип эквивалентности» может быть распространен на любое относительное движение любой системы отсчета. Если на основе этой фундаментальной идеи можно создать последовательную теорию, то само собой должен удовлетворяться надежно установленный эмпирический факт равенства инертной и тяжелой масс.

Нелинейные преобразования четырех координат, рассматриваемые в четырехмерном пространстве, соответствуют переходу от S_1 к S_2 . Теперь возникает вопрос: какого рода нелинейные преобразования допустимы, или, как должно быть обобщено преобразование Лоренца? Для ответа на этот вопрос решающее значение имеет следующее рассуждение.

Инерциальной системе прежней теории мы приписываем такое свойство: разности координат измеряются покоящимися «твердыми» измерительными стержнями, а разности значений времени — покоящимися часами. Первое предположение дополняется другим предположением, а именно, что для относительного расположения измерительных стержней в покое выполняются теоремы евклидовой геометрии о «расстояниях». Тогда из результатов специальной теории относительности, путем элементарных рассуждений, приходим к заключению, что оказывается утраченной прямая физическая интерпретация координат для системы отсчета (S_2), ускоренной относительно инерциальной системы (S_1). Но если это так, то координаты выражают только порядок или степень «близости», а следовательно, и размерность пространства, но не

выражают никаких его метрических свойств. Мы пришли, таким образом, к распространению преобразований на произвольные непрерывные преобразования⁵. Это включает в себе общий принцип относительности: законы природы должны быть ковариантны относительно произвольных непрерывных преобразований координат. Это требование (в сочетании с требованием наибольшей возможной логической простоты этих законов) ограничивает рассматривавшиеся законы природы несравнимо сильнее, чем специальный принцип относительности.

Такой ход мыслей существенно основан на понятии поля как независимом понятии. Так как условия, существующие по отношению к S_2 , интерпретируются как гравитационное поле, несомненно наличие масс, которые создают это поле. На основании этого хода мыслей можно также понять, почему законы чисто гравитационного поля более непосредственно связаны с идеей общей относительности, чем законы полей более общего вида (например, электромагнитного поля). Именно, мы имеем хорошую основу для предположения, что «свободное от поля» пространство Минковского представляет собой возможный частный случай и даже простейший мыслимый частный случай. Что касается метрических свойств такого пространства, то оно характеризуется тем, что $dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$ есть квадрат измеренного единичным масштабом пространственного расстояния между двумя бесконечно близкими точками трехмерного сечения «пространственного типа» (теорема Пифагора), тогда как dx_4 есть измеренный совместно с (x_1, x_2, x_3) соответствующим временным масштабом интервал времени между двумя событиями. Как нетрудно показать с помощью преобразований Лоренца, все это просто означает, что объективный метрический смысл придается величине

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2. \quad (1)$$

Математически это означает, что величина ds^2 инвариантна по отношению к преобразованиям Лоренца.

Если теперь, в смысле общего принципа относительности, пространство [ср. формулу (1)] подвергается произвольному непрерывному преобразованию координат, то величина ds , имеющая объективный смысл, выражается в новой системе координат соотношением

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k, \quad (1a)$$

где должно быть выполнено суммирование по индексам i и k для всех

⁵ Эта не вполне точная формулировка, вероятно, достаточна здесь.

комбинаций 11, 12, . . . , 44. Компоненты g_{ik} теперь уже не константы, а функции координат, которые определены произвольно выбранным преобразованием. Тем не менее, компоненты g_{ik} являются не произвольными функциями новых координат, но функциями такого рода, что форма (1a) может быть преобразована снова в форму (1) непрерывным преобразованием четырех координат. Чтобы это было возможно, функции g_{ik} должны удовлетворять определенным общековариантным соотношениям, которые были выведены Б. Риманом более чем за полстолетия до формулирования общей теории относительности («условие Римана»). Согласно принципу эквивалентности, соотношение (1a) описывает в общековариантной форме гравитационное поле специального вида, если функции g_{ik} удовлетворяют условию Римана.

Отсюда следует, что уравнения чисто гравитационного поля общего вида должны быть удовлетворены, если выполняется условие Римана; но они должны быть слабее, чем условия Римана. Таким путем закон чисто гравитационного поля практически полностью определяется; мы не будем здесь обосновывать этого более детально.

Мы в состоянии теперь видеть, насколько переход к общей теории относительности видоизменяет понятие пространства. В соответствии с классической механикой и согласно специальной теории относительности, пространство (пространство-время) существует независимо от материи или поля. Для описания того, что заполняет пространство и зависит от координат, нужно, чтобы пространство-время, или инерциальная система, с ее метрическими свойствами, мыслились существующими с самого начала, так как иначе описание «того, что заполняет пространство», не имело бы смысла⁶. С другой стороны, согласно общей теории относительности, не существует отдельно пространство, как нечто противоположное «тому, что заполняет пространство» и что зависит от координат. Таким образом, чисто гравитационное поле может быть описано с помощью g_{ik} (как функций координат), путем решения уравнений гравитации. Если мы представим себе, что гравитационное поле, т. е. функции g_{ik} , устранено, то не останется не только пространства типа (1), но и вообще *ничего*, в том числе и «топологического пространства». В самом деле функции g_{ik} описывают не только поле, но и в то же самое время топологические и метрические структурные свойства многообразия. Пространство типа (1) с точки зрения общей теории относительности не есть пространство без поля, но представляет собой частный случай поля

⁶ Если мы представим себе, что «то, что заполняет пространство» (например, поле) удалено, то все еще оставалось бы метрическое пространство, соответствующее форме (1), которое определяло бы также инерциальное поведение помещенного в него пробного тела.

g_{ik} , когда — в определенной системе координат, которая сама по себе не имеет объективного значения — функции g_{ik} имеют значения, независимые от координат. Пустое пространство, т. е. пространство без поля, не существует. Пространство-время существует не само по себе, но только как структурное свойство поля.

Таким образом, Декарт был не так далек от истины, когда полагал, что существование пустого пространства должно быть исключено. Эта точка зрения действительно казалась абсурдной до тех пор, пока физическую реальность видели исключительно в весомых телах. Потребовалась идея поля, как реального объекта в комбинации с общим принципом относительности, чтобы показать истинную сущность идеи Декарта: не существует пространство, «свободное от поля».

Обобщенная теория гравитации

На основе общей теории относительности можно построить теорию чисто гравитационного поля, поскольку мы можем быть уверены в том, что «свободное от поля» пространство Минковского с его метрикой, соответствующей форме (1), удовлетворяет общим законам поля. Из этого частного случая закон тяготения следует в результате обобщения, которое практически свободно от произвола. Дальнейшее развитие теории определяется общим принципом относительности не столь однозначно; в течение последних десятилетий были предприняты попытки в различных направлениях. Общим для всех этих попыток было представление физической реальности как некоторого поля, которое является обобщением гравитационного поля и полевые законы которого являются обобщением закона чисто гравитационного поля. После долгих поисков (в которых приходилось идти оцупью) я думаю, что теперь нашел⁷ наиболее естественную форму этого обобщения, но еще не в состоянии выяснить, может ли этот обобщенный закон выдержать сравнение с опытными фактами.

Для общей теории вопрос о законах этого особого поля является вторичным. Главный вопрос в настоящее время заключается в следующем: может ли теория поля рассмотренного здесь вида вообще привести нас к цели? Такая теория должна описать исчерпывающим образом физи-

⁷ Это обобщение можно охарактеризовать следующим образом. В соответствии с их происхождением из пустого «пространства» Минковского, функции g_{ik} чисто гравитационного поля обладают свойством симметрии: $g_{ik} = g_{ki}$ ($g_{12} = g_{21}$ и т. д.). Обобщенное поле есть поле того же рода, но не обладающее этим свойством симметрии. Вывод закона поля полностью аналогичен выводу его в частном случае чистой гравитации.

ческую реальность как поле. Современное поколение физиков склонно ответить на этот вопрос отрицательно. Соглашаясь с современной формой квантовой теории, они считают, что состояние системы не может быть охарактеризовано непосредственно, но только косвенно, путем установления статистического распределения результатов измерений над системой. Преобладает убеждение, что надежно установленный экспериментально дуализм природы (корпускулярные и волновые свойства) может быть понят только на пути такого «ослабления» понятия реальности. Я думаю, что такая далеко идущая теоретическая уступка пока еще не оправдывается нашими фактическими знаниями и что не следует отказываться идти до конца по пути релятивистской теории поля.