

II. Общая теория относительности

8. Теория относительности и гравитация

Специальная теория относительности появилась на свет, когда понадобилось устранить кажущееся противоречие между классической ньютоновской физикой и новой теорией электромагнитного поля. Вернувшись снова к принципу относительности и отказавшись от возможности абсолютного движения и абсолютного покоя, Эйнштейн сумел сочетать казалось бы совершенно несовместимые условия — универсальность скорости света в пустоте и равноправие всех инерциальных систем отсчета — путем глубокого изменения наших представлений о пространстве и времени. Всякие изменения в представлениях о пространстве и времени требуют существенных корректировок в физике, куда больших, чем в других областях естественных наук, поскольку пространство и время образуют тот самый помост, на котором разыгрываются и описываются физические процессы. Такого рода корректировки особенно существенны для теорий, касающихся фундаментальных аспектов элементарных частиц и их взаимодействий.

Необходимость пересмотра представлений по-разному проявляется в различных областях науки. Исследование тайн природы всегда происходит на совершенно различных уровнях по глубине и сложности. Живые организмы, например, представляют собой системы чрезвычайной сложности, динамика которых не может быть сведена к подробному описанию всех взаимодействий атомов и молекул, входящих в их состав. Никому не придет в голову предложить, чтобы биологические исследования были отложены до тех пор, пока все элементарные процессы, которые в своей совокупности обуславливают жизнь, не будут полностью и по отдельности раскрыты. Однако когда речь идет об объяснении спектра атома водорода, атома

образованного всего лишь двумя частицами — одним протоном и одним электроном, — ученые не могут быть удовлетворены до тех пор, пока все тонкие детали спектра не будут разъяснены на основе закона взаимодействия протона и электрона.

Более глубокое понимание на одном уровне сложности обычно не проходит бесследно и для понимания на близлежащих уровнях, по может оказаться не слишком существенным для относительно удаленных уровней сложности. Лучшее понимание динамики атомов облегчает изучение молекул и дает свой вклад в физику кристаллов; однако динамика атомов мало что дает для понимания особенностей пресмыкающихся. Почти так же между физикой атомов и физикой элементарных частиц не слишком много точек соприкосновения, хотя в этом случае существует определенная взаимосвязь. Мы не удивимся поэтому, что и та революция в наших представлениях, имя которой специальная теория относительности, совсем по-разному коснулась различных областей физики.

Существует несколько причин, по которым исследования элементарных составляющих вещества и фундаментальных сил не могут обойтись без теории относительности. Взаимодействия между элементарными частицами и полями происходят чаще всего при очень больших скоростях частиц, когда различие между ньютоновской и релятивистской физикой выступает вполне отчетливо. Наоборот, молекулы в газе, молекулы, входящие в состав кристаллов, или, наконец, молекулы живых организмов, как правило, не имеют значительных скоростей, и для них релятивистские эффекты несущественны. Когда мы имеем дело с изучением взаимодействий на фундаментальном уровне, то необходимая степень понимания проблемы — куда в большей степени, чем наличие высоких скоростей само по себе, — требует обязательного привлечения идей теории относительности.

Чем глубже уходят наши исследования в конечные составляющие вещества и чем меньше остается число частиц и сил, действующих между ними, тем настойчивее становятся требования исчерпывающего понимания действия и структуры каждой компоненты материи. Именно по этой причине, когда Эйнштейн и многие другие физики убедились в том, что специальная теория относительности пришла на смену ньютоновской физике, они запылись

снова фундаментальными свойствами частиц и силовых полей. Наиболее важным объектом, требующим пересмотра, была гравитация (всемирное тяготение).

Гравитация была краеугольным камнем ньютоновской теории физического взаимодействия, а наиболее внушительных успехов механика Ньютона достигла в объяснении наблюдаемых орбит планет и спутников в нашей солнечной системе. Любая новая теория в физике, чтобы быть приемлемой, обязана воспроизводить эти результаты. Но вся ньютоновская механика опирается на представление об универсальном времени; при этом предполагалось, что силы, с которыми Солнце и планеты действуют друг на друга, определяются только их взаимным расположением *в одно и то же время*. Ньютоновское описание гравитационного взаимодействия называют еще «действием на расстоянии». Поскольку расстояние между двумя любыми телами все время меняется при движении тел по их траекториям, существенно, что расстояние между телами однозначно определено как расстояние в заданный момент времени.

Но если в ньютоновской физике расстояние между двумя физическими объектами в любой выбранный момент времени определено вполне четко независимо от того, движутся эти тела или покоятся, релятивистский способ определения моментов времени и координат точек и в особенности зависимость этих определений от системы отсчета ведут к неоднозначности. Эти трудности можно проиллюстрировать с помощью рис. 37. На этом рисунке изображены траектории двух объектов A и B на пространственно-временной диаграмме, на которой для простоты показано лишь одно пространственное измерение. Объекты A и B движутся относительно друг друга, траектории каждого из этих объектов времениподобны, как это видно из наклона, соответствующего двум светоподобным направлениям, отмеченным буквами s и s' . На рисунке изображены две пары координатных осей (x, t) и (x', t') , соответствующих двум лоренцевым системам отсчета; обе эти системы, следовательно, допустимы и равноправны. Если выбрать некоторый определенный момент в «истории» A , скажем, момент T , расстояние от B до A будет измеряться по двум различным линиям, соединяющим эти отрезки (эти линии проведены пунктиром), в зависимости от того, в какой системе отсчета это расстояние измеряется. Из

рисунка видно, что расстояние оказывается разным в двух лоренцевых системах отсчета. Не существует способа, с помощью которого можно было бы выбрать «привилегированную» лоренцеву систему отсчета, чтобы в ней определять «истинное» расстояние между многочисленными астрономическими телами; такое «истинное» расстояние можно было бы, конечно, использовать для вычисления

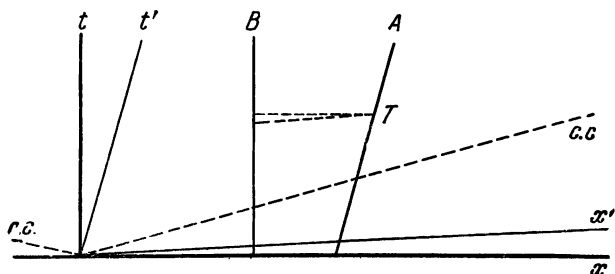


Рис. 37. Неопределенность при измерении расстояния между движущимися объектами.

гравитационного взаимодействия между этими телами. Правда, в солнечной системе и даже во всей нашей Галактике относительные движения входящих в эти образования тел настолько медленны, что практически безразлично, выбрать ли за лоренцеву систему Галактику или ту систему, в которой покоится центр инерции солнечной системы. Конечно, пренебрежимая малость релятивистских эффектов может объяснить, почему использование ньютоновских методов расчета приводит к результатам в высшей степени удовлетворительным. Однако принципиально использование взаимно исключаящих друг друга представлений о пространстве и времени при рассмотрении электромагнитных и гравитационных взаимодействий ни в коем случае не допустимо.

С некоторой точки зрения аналогичная ситуация возникает в теории электромагнитных явлений, так как сила, действующая между двумя покоящимися зарядами, также определяется в зависимости от расстояния между ними; она обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами, в точности как сила тяготения. Закон, о котором идет речь, известен в теории электричества под названием

закона Кулона; он носит имя французского физика Шарля Августина Кулона (1736—1806). Различие между кулоновским законом взаимодействия зарядов и ньютоновским законом для гравитационного взаимодействия состоит в том, что в законе Кулона ту роль, которая отведена в законе Ньютона массам, играют электрические заряды. В теории электричества кажущееся противоречие между представлениями теории относительности и законом взаимодействия между зарядами снимается тем, что опыт показывает, что этот закон справедлив, строго говоря, лишь в том случае, если заряженные тела (заряды) покоятся относительно друг друга. Но если заряды покоятся в некоторой системе отсчета, то именно эта система отсчета и является той «подходящей» системой, которую следует использовать. Когда заряженные частицы движутся относительно друг друга, то взаимодействие между ними уже не подчиняется закону Кулона, а оказывается значительно более сложным и описывается через поля, порождаемые взаимодействующими зарядами.

Каждый электрический заряд порождает электрическое поле и, кроме того, также магнитное поле, за исключением того случая, когда он покоится. И то и другое поле распространяется с конечной скоростью, равной скорости света. Сила, испытываемая любым зарядом, в свою очередь зависит от полей в том месте, где находится этот заряд; однако эти поля создаются всеми остальными зарядами, причем в достаточно удаленные в прошлое времена, такие, чтобы поле могло дойти до рассматриваемой точки в нужный момент. Эта сложная взаимная игра зарядов и полей, как оказывается, должна подчиняться всегда одинаковым правилам независимо от состояния движения наблюдателя, который получает необходимые данные в результате своих экспериментов. Если две заряженные частицы покоятся относительно друг друга, сложная игра частица — поле — частица в конечном счете приводит к простому закону Кулона.

Но почему бы несоответствие между относительностью времени и законом тяготения Ньютона не разрешить столь же просто, как в электродинамике? Следовало бы ввести представление о гравитационном поле, которое распространялось бы примерно так же, как электрическое и магнитное поля, и которое оказалось бы посредником при гравитационном взаимодействии небесных тел, в согласии

с представлениями теории относительности. Это гравитационное взаимодействие сводилось бы к ньютоновскому закону тяготения, когда относительные скорости рассматриваемых астрономических тел были бы малы по сравнению со скоростью света. Эйнштейн попытался построить релятивистскую теорию тяготения на этой основе, но одно обстоятельство не позволило ему осуществить это намерение: никто ничего не знал о распространении гравитационного взаимодействия с большой скоростью, имелась лишь некоторая информация относительно эффектов, связанных с большими скоростями движения источников гравитационного поля — масс.

Влияние больших скоростей на массы непохоже на влияние больших скоростей на заряды. Если электрический заряд тела остается одним и тем же для всех наблюдателей, масса тел зависит от их скорости относительно наблюдателя. Чем выше скорость, тем больше наблюдаемая масса. Для заданного тела наименьшая масса будет определена наблюдателем, относительно которого тело покоится. Это значение массы называется массой покоя тела. Для всех остальных наблюдателей масса окажется больше массы покоя на величину, пропорциональную кинетической энергии тела, как это указывалось в п. 6. Значение массы стало бы бесконечным в той системе отсчета, в которой скорость тела стала бы равной скорости света. Конечно, о такой системе отсчета можно говорить лишь условно. Поскольку величина источника тяготения столь существенно зависит от системы отсчета, в которой определяется ее значение, порождаемое массой поле должно быть более сложным, чем электромагнитное поле. Эйнштейн заключил поэтому, что гравитационное поле, по видимому, представляет собой так называемое тензорное поле, описываемое большим числом компонент, чем электромагнитное поле.

В качестве следующего исходного принципа Эйнштейн постулировал, что законы гравитационного поля должны получаться на основе математической процедуры, аналогичной процедуре, приводящей к законам электромагнитной теории; законы гравитационного поля, получаемые таким способом, очевидно, должны быть сходны по форме с законами электромагнетизма. Эти постулаты представляются вполне разумными в силу тождественного вида законов Ньютона и закона Кулона.

Но даже принимая во внимание все эти соображения, Эйнштейн обнаружил, что он может построить несколько различных теорий, которые в равной степени удовлетворяют всем требованиям. Из этих теорий вытекало наличие некоторых эффектов, величина которых была различной для разных теорий, однако сами эти эффекты были настолько малы, что в первом десятилетии двадцатого века не было никаких надежд сделать выбор между этими теориями на основе экспериментальных исследований или данных наблюдений. Требовалась несколько иная точка зрения, чтобы однозначно прийти к релятивистской теории тяготения. Эйнштейн нашел такую новую точку зрения в принципе эквивалентности (см. п. 1), согласно которому ускорение, приобретаемое телом в поле сил тяготения, не зависит от характеристик этого тела.

9. Относительность свободного падения

Как в ньютоновской физике, так и в специальной теории относительности, постулируется существование инерциальных систем отсчета. Повторим, что значит инерциальная система. *Инерциальная система отсчета* — это такая система отсчета, относительно которой тела движутся равномерно и прямолинейно (т. е. без ускорения), когда на них не действуют внешние силы. Экспериментальное нахождение такой инерциальной системы зависит от того, сможем ли мы поставить некоторые тела (пробные тела, как говорят) в такие условия, когда на них не действуют никакие внешние силы, причем должно быть экспериментальное подтверждение отсутствия таких сил. Но как можно достичь такого состояния, в котором внешних сил нет? Обычный ответ состоит в том, что пробное тело следует отвести на достаточное расстояние от всех других тел, которые могут быть источниками сил, поскольку известно, что все силы убывают и стремятся к нулю на достаточном удалении от источника сил.

Следовательно, взглянув на окружение пробного объекта, можно выяснить, есть ли поблизости от него возможные источники внешних сил. Но возможность осмотра зависит от наличия оптических или каких-то иных инструментов, позволяющих просматривать значительные части пространства. Было бы желательно выяснить, существуют ли такие процедуры, с помощью которых можно установить