



GALILAEUS GALILAEI PATRICIUS FLOR.
AET. SUAE
ANNUM AGENS QUADRAGESIMUM

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

К 400-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЯ

В 1964 г. исполняется 400 лет со дня рождения Галилео Галилея. В связи с этим мы печатаем доклад В. А. Фока, подготовленный им для торжества, которые состоятся в Италии в сентябре этого года. Мы воспроизводим также статью С. И. Вавилова «Галилей в истории оптики». Статья была опубликована в 1943 г. во время Великой Отечественной войны в сборнике «Галилео Галилей», выпущенном Академией наук СССР по поводу 300-летия со времени смерти Галилея. Так как этот сборник был издан в военное время очень малым тиражом, он давно представляет собой библиографическую редкость и ценная статья С. И. Вавилова мало известна.

530.12

ПРИНЦИПЫ МЕХАНИКИ ГАЛИЛЕЯ И ТЕОРИЯ ЭЙНШТЕЙНА

В. А. Фок

Великому итальянскому ученому Галилео Галилею мы обязаны двумя принципами механики, которые оказали чрезвычайно большое влияние на развитие не только самой механики, но и всей физики.

Мы имеем в виду, во-первых, галилеевский принцип относительности для прямолинейного и равномерного движения. В лаборатории, находящейся в прямолинейном и равномерном движении по отношению к другой, неподвижной, лаборатории, все происходит так, как в этой последней. Для пояснения своего принципа Галилей сравнивал физические явления внутри неподвижного корабля с явлениями внутри корабля равномерно движущегося; он говорил о двух кораблях, а не о двух лабораториях. Однако приведенные Галилеем многочисленные примеры физических явлений, которые могут происходить внутри корабля, ясно показывают, что Галилей имел здесь в виду именно то, что мы теперь называем лабораторией. Следует подчеркнуть чисто физический и доступный экспериментальной проверке характер утверждения Галилея.

Второй принцип Галилея может быть связан с его наблюдениями над падением тел в пустоте. Галилей установил, что все тела, каков бы ни был их вес, падают с одинаковой скоростью, если они не испытывают сопротивления среды. Если ввести, по Ньютону, понятие ускорения, то этот принцип может быть сформулирован словами: все тела, падающие в пустоте, испытывают одно и то же ускорение.

За время от Галилея до наших дней эти принципы претерпели развитие, представляющее большой интерес.

Прежде всего, они были уточнены на основе установленных Ньютоном законов движения. Первый закон Ньютона, относящийся, как и первый галилеевский принцип, к прямолинейному и равномерному движению, указывает ту систему отсчета, в которой справедлив этот принцип. Это есть инерциальная система Ньютона. В самом деле, первый закон Ньютона может быть истолкован как определение инерциальной системы. Его можно читать так: существует система отсчета, в которой тело, не подверженное действию сил, движется прямолинейно и равномерно. Именно в этой системе отсчета и имеют место остальные законы Ньютона. При таком толковании становится понятным, почему Ньютон формулировал свой первый закон движения как отдельный закон, а не как следствие второго закона, относящегося к более сложному случаю движения под действием сил. Итак, принцип относительности Галилея связан с понятием инерциальной системы отсчета. С другой стороны, второй принцип Галилея, относящийся к свободному падению тел, связан с понятиями инертной и весомой массы, также основанными на идеях Ньютона. Этот принцип может быть формулирован как равенство той и другой массы (или как эквивалентность соответствующих понятий).

Через три столетия после Галилея его принципы механики претерпели обобщение в теории относительности Эйнштейна. Впрочем, правильное говорить о двух различных направлениях, в которых шло обобщение, причем только одно из них представляется нам вполне оправданным.

Во-первых, принцип относительности для прямолинейного и равномерного движения был распространен на все физические явления, включая электромагнитные, в частности, распространение света. В своей теории относительности, созданной в 1905 г., Эйнштейн вывел из этого принципа следствия, относящиеся к природе пространственно-временных отношений между различными событиями физического мира, иначе говоря, относящиеся к природе пространства и времени. Существенно отметить, что полученные таким путем свойства пространства и времени, из коих наиболее важным является существование предельного значения для скорости распространения всякого рода действия, характеризуют пространство абсолютным образом, а не только по отношению к данному наблюдателю. Относительное привело к абсолютному. Чтобы подчеркнуть этот факт, можно было бы, следуя удачному предложению Фоккера, называть теорию Эйнштейна хроногеометрией (а не теорией относительности).

Итак, первое обобщающее направление распространяет принцип относительности Галилея на все физические явления (а не только на механические), но по-прежнему применяет его только к прямолинейному и равномерному движению систем отсчета. Уравнения преобразования для пространственно-временных переменных (декартовых координат и времени) в двух взаимно движущихся системах отсчета остаются линейными, как и в преобразовании Галилея, но коэффициенты в них уже будут другими: преобразование Галилея заменяется преобразованием Лоренца.

Второе обобщающее направление, по которому следовал Эйнштейн, имеет исходной точкой толкование второго принципа Галилея как принципа эквивалентности между кинематическим ускорением и напряжением силы тяжести, иначе говоря, между силами инерции и силами тяготения. Это кинематическое толкование силы тяжести, называемое просто «принципом эквивалентности», было объединено Эйнштейном с принципом относительности, и объединение этих принципов привело Эйнштейна к идее «общей относительности». Несмотря на весьма неопределенный и спорный характер этой идеи, для гения Эйнштейна она оказалась достаточной, чтобы привести его к его замечательной теории тяготения, которую он назвал общей теорией относительности.

Скажем сразу же, что эйнштейновская теория тяготения, являющаяся вместе с тем теорией пространства и времени, есть творение гения. Она убеждает красотой своего замысла и его математического осуществления. Она дает давно ожидавшееся решение ряда проблем, поставленных теорией Ньютона (например, проблемы дальнего действия). Она допускает астрономическую проверку и даже проверку в лаборатории. Но это не есть общая теория относительности, потому что общей относительности не существует.

Принимая без оговорок окончательный результат Эйнштейна, выражаемый посредством его знаменитых тензорных ковариантных уравнений тяготения, мы должны все же проверить, являются ли рассуждения, приведшие его к этим уравнениям, вполне логичными. Мы должны посмотреть, допустимо ли говорить об общей относительности и о полной эквивалентности полей ускорения и тяготения, или же следует предпочесть более осторожную точку зрения, которая вместе с тем ближе к галилеевской. Эта точка зрения принимает принцип относительности только для прямолинейного и равномерного движения, а также использует принцип равенства инертной и весовой массы. Становясь на эту точку зрения, мы должны будем признать, что понятия общей относительности и полной эквивалентности не являются, вопреки Эйнштейну, истинными принципами его теории. Нам придется тогда ответить на вопрос: каковы же те истинные принципы, которые лежат в основе теории тяготения Эйнштейна?

Чтобы иметь надежную отправную точку для нашего анализа, попытаемся формулировать более точно, что мы разумеем под принципом относительности. Такое уточнение тем более необходимо, что этому термину приписываются совершенно различные значения, которые в основном сводятся к математическому и к физическому.

Мы будем понимать данный термин в физическом смысле и будем разуметь под относительностью существование соответственных физических процессов (или явлений) в двух системах отсчета (в двух лабораториях). Это означает, что к а ж д о м у процессу в одной системе соответствует т а к о й же процесс в другой системе. (Смысл слова «такой же» может быть уточнен следующим образом: пусть явление, происходящее в каждой из двух систем-лабораторий, описывается посредством функций от переменных, относящихся к этой системе; тогда явления будут одинаковы, если математическая форма этих функций будет одинакова для обеих систем.)

В том случае, когда обе системы отсчета являются инерциальными, мы возвращаемся к принципу относительности Галилея в его точной формулировке. В этом случае определение системы отсчета, связанной с лабораторией, не представляет никаких затруднений, и в качестве такой системы отсчета можно взять декартовы координаты и время. Две такие системы отсчета связаны преобразованиями Лоренца. Отсюда явствует связь между относительностью в физическом смысле и поведением уравнений при преобразованиях координат.

Напротив, всякая попытка применить эти определения к неинерциальным системам отсчета и к неравномерному движению наталкивается на непреодолимые трудности. Это значит, что всякая попытка провести идею «общей относительности» оказывается несостоятельной.

Прежде всего, для ускоренных движений поведение лаборатории (и даже ее геометрическая форма) зависит от устройства этой лаборатории, так что общее определение системы-лаборатории становится невозможным. Но это затруднение еще не наихудшее. Решающим является тот простой факт, что принцип относительности в собственном смысле слова, т. е. понимаемый как физический принцип, очевидно не имеет места для

ускоренных систем. Чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть часы с гириями и маятником на Земле и на Спутнике. Такие часы могут прекрасно идти в земной лаборатории (они могут служить там весьма точным средством измерения времени), но они вовсе не будут идти на Спутнике. Более того: не существует физического явления на Спутнике, которое бы соответствовало ходу таких часов на Земле. Основная предпосылка принципа относительности — существование соответственных физических процессов — в этом случае не выполняется.

Чтобы избежать этих трудностей и получить возможность применять понятие относительности к неравномерному движению, Эйнштейн ввел, хотя и в замаскированной форме, два очень существенных изменения в смысл терминов «система отсчета» и «принцип относительности». Во-первых, он изменил определение системы отсчета и стал понимать под этим термином не физическую систему-лабораторию, а систему координат. Поскольку нелинейное по времени преобразование координат означает введение в уравнения движения фиктивного поля тяготения, а также сил Кориолиса, это новое определение системы отсчета уже означает, строго говоря, отказ от физического принципа относительности. Этот принцип был «подправлен» Эйнштейном посредством принципа эквивалентности, заимствованного из второго механического принципа Галилея. Даже в простейшем случае чисто поступательного движения (без вращения) существование соответственных процессов в двух лабораториях покупается ценой введения в одну из них фиктивного поля тяготения (которое должно компенсировать, при надобности, реальное поле тяготения). Так, например, реальная лаборатория внутри Спутника сравнивается не с реальной же лабораторией на Земле, а с фиктивной лабораторией, которая хотя и неподвижна относительно Земли, но отличается от реальной земной лаборатории отсутствием в ней поля тяготения.

Возвратимся к принципу эквивалентности. Не подлежит сомнению, что этот принцип позволяет в общем случае исключить в достаточно малой области пространства (например, внутри Спутника) поле тяготения. Однако и применение принципа эквивалентности не может спасти идею общей относительности. (Мы уже не говорим об электрических силах, которых исключить таким путем нельзя и которые могли бы, в принципе, указать на наличие абсолютного ускорения или вращения.) Чтобы иметь возможность говорить об общей относительности, Эйнштейн был вынужден лишиться этот термин его физического содержания и приписать ему совсем другой, чисто математический смысл. Сначала он дал этому термину несколько туманное толкование «одинаковой формы законов природы» в разных системах отсчета; затем он заменил системы отсчета системами координат, а законы природы дифференциальными уравнениями поля или уравнениями движения (хотя одних дифференциальных уравнений и недостаточно для определения хода физического процесса). В результате Эйнштейн пришел к толкованию «общей относительности» как «ковариантности дифференциальных уравнений при произвольном преобразовании координат». Но это новое толкование есть нечто совсем другое, чем физический принцип относительности. Оно представляет чисто логическое (а отнюдь не физическое) требование, которое должно выполняться всегда, даже если физический принцип относительности не имеет места. В самом деле, пока не выбрана координатная система, для получения однозначных результатов необходимо, чтобы дифференциальные уравнения, написанные во всех допустимых координатных системах, были эквивалентны. Давно известен и пример математического аппарата, удовлетворяющего этому требованию: мы имеем в виду уравнения Лагранжа второго рода.

Нападая на идею общей относительности и подчеркивая ограниченный характер принципа эквивалентности, мы, однако, далеки от того, чтобы отрицать эвристическое значение этих принципов и их историческую роль в создании Эйнштейном теории тяготения. Каковы бы ни были логические пробелы в рассуждениях Эйнштейна, мы готовы допустить, что принципы относительности и эквивалентности указали ему на те выгоды, какие можно извлечь из сопоставления кинематических пространственно-временных соотношений с явлением тяготения, а также помогли ему найти математическую форму, достаточно простую и вместе с тем ковариантную, его уравнений тяготения.

Соглашаясь с этим, мы должны, тем не менее, констатировать, что указанные два принципа не составляют истинной логической основы теории Эйнштейна. Поэтому перед нами стоит задача найти другие принципы, которые действительно содержатся в теории Эйнштейна и уже могут рассматриваться как ее логическая основа. Поскольку Эйнштейн дал нам полную математическую формулировку своей теории тяготения, эти истинные принципы указать нетрудно.

Первой основной идеей теории является объединение пространства и времени в единое хроногеометрическое многообразие с четырьмя измерениями, из коих одно имеет характер времени, а три остальных — пространственные. Последнее обстоятельство выражают словами: метрика многообразия пространства — времени indefinite и имеет сигнатуру $(+, -, -, -)$. Такая форма метрики связана с законом распространения всякого действия, идущего с предельной скоростью, например фронта световой волны. Эта предельная скорость всегда равна скорости света. Существование предельной скорости является фундаментальным фактом физического мира и его осознание глубоко изменило наши представления о пространстве и времени. Заметим, что, согласно Роббу и Александрову, этот факт связан с понятиями причины и следствия.

Идея объединения пространства и времени была осуществлена Эйнштейном в двух формах его теории относительности: в теории 1905 г., которую принято называть частной, и в теории 1916 г., которую принято называть общей. В теории 1905 г. метрика пространства — времени допускает для бесконечно малого интервала выражение с постоянными коэффициентами; в теории же 1916 г. метрика предполагается более общей, а именно римановой (ее характеризуют как раз значения коэффициентов в выражении для интервала — составляющих метрического тензора).

Второй основной идеей теории тяготения Эйнштейна, идеей, которая отличает эту теорию от так называемой частной теории относительности, является отказ от жесткости метрики. Согласно этой идее, метрика пространства — времени не задана раз навсегда, она не является «жесткой», но может зависеть от происходящих в пространстве и времени процессов, а в первую очередь от распределения и движения масс. Эта идея, зародившаяся у Эйнштейна между 1908 и 1915 г. (вероятно, в 1911 г., во время его пребывания в Праге) представляет нечто совершенно новое — Эйнштейн не имел здесь предшественников. Значение этой идеи огромно. Опираясь на эту идею, Эйнштейн смог установить связь между метрикой пространства — времени и явлением тяготения, связь настолько тесную, что можно говорить о единстве того и другого. Это единство выражается формально в том, что составляющие метрического тензора вполне определяют поле тяготения, так что никаких других функций для характеристики этого поля вводить не нужно. Как известно, если исходить из такого предположения и использовать аналогию с уравнениями тяготения теории Ньютона, то уравнения Эйнштейна получаются почти единственным образом.

Мы видели, как механические принципы Галилея, истолкованные Эйнштейном не всегда последовательно и логично, помогли ему сформулировать свою замечательную теорию тяготения, две основные идеи которой мы попытались выше изложить. Но соотношение между принципами Галилея и теорией Эйнштейна может быть рассмотрено и с другой точки зрения. Мы можем поставить себе вопрос: принимая теорию Эйнштейна в ее окончательном виде, что можно сказать о месте, занимаемом в этой теории принципами Галилея?

На первый взгляд могло бы показаться, что поскольку принцип относительности Галилея применим лишь к прямолинейному и равномерному движению, он не играет в этой теории никакой роли, так как при наличии масс и полей тяготения пространство—время перестает быть однородным (выражение для интервала не сводимо тогда к постоянным коэффициентам). Однако в действительности это не так. В самом деле, на метрический тензор можно всегда наложить четыре дополнительных уравнения, совместных с уравнениями Эйнштейна и представляющих ограничение, налагаемое на выбор координат. Согласно этому условию, каждая из пространственных координат, а также временная переменная, должны удовлетворять волновому уравнению. Для системы масс, подобной Солнечной системе, можно, сверх того, подчинить метрический тензор предельным условиям на бесконечности, выражающим изолированность данной системы масс и евклидовость на бесконечности. При этих условиях можно утверждать, что система координат (которую принято называть «гармонической») определяется однозначно, с точностью до преобразования Лоренца. В теории тяготения Эйнштейна гармоническая система координат представляет наивозможно близкий аналог тем переменным (декартовым координатам и времени), которые принадлежат некоторой инерциальной системе в смысле Ньютона. Поскольку допустимые преобразования гармонических координат сводятся к линейным, прямолинейное и равномерное движение сохраняет за собой то привилегированное положение, какое оно занимало в принципе относительности Галилея. Этот принцип остается, следовательно, в силе как физический принцип также и в рассматриваемом случае неоднородного пространства Эйнштейна. Само собой разумеется, что в понятие соответственных физических процессов в двух системах отсчета должно входить также и соответственное расположение и движение тяжелых масс. Заметим, что самая возможность ввести понятие соответственных физических процессов в неоднородном пространстве существует только благодаря отказу от жесткости метрики.

Что касается второго принципа Галилея, истолкованного в духе Ньютона как равенство массы инертной и массы весомой, то этот принцип остается в силе с той точностью, с какой возможно независимое определение той и другой массы. В теории Эйнштейна такое определение возможно только как приближение. Но если решать уравнения Эйнштейна для системы движущихся тел, для каждого тела одна и та же константа будет входить в решение как масса инертная и как масса весомая; поэтому можно сказать, что в теории Эйнштейна равенство масс выполняется автоматически. Заметим, что это равенство, а с ним и второй принцип Галилея, не имеет того чисто локального характера, каким обладает принцип эквивалентности.

Проанализированные нами механические принципы Галилея составляют только часть его гигантских научных достижений, значение которых для физики может быть прослежено вплоть до наших дней. Но каким бы кратким и неполным ни был наш анализ, он показывает, насколько глубоко было влияние Галилея на человеческую мысль. Это влияние продолжается и ныне — оно длится в веках.