

III

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. ОТ НЬЮТОНА К ЭЙНШТЕЙНУ

Представление о тяготении как о всеобщем свойстве материи, не оформленное в качестве научной теории, возникло задолго до Ньютона. Уже Коперник (1473—1543) высказывался о взаимном притяжении частиц Земли как о причине ее шарообразности.

«По моему мнению, — писал Коперник, — тяжесть есть не что иное, как естественное устремление, которым божественное провидение творца одарило части для сочетания и соединения их в единое целое в форме сферы. Такое стремление свойственно, вероятно, Солнцу, Луне и прочим блуждающим светилам и, благодаря его действию, они сохраняют свою очевидную шарообразность, несмотря на многообразие совершаемых ими обращений» [1].

По-видимому, Коперник считал вероятным существование для каждого светила своего центра тяжести. Последователи Коперника полагали, что все тяжелые тела стремятся к центру мира и направляются к нему прямолинейно естественным движением. Для дальнейшего развития теории особо важную роль сыграли труды Кеплера (1571—1630) [2]. В сочинении «Новая астрономия с объяснением причины явлений, или Небесная физика» Кеплер дал два первых закона движения планет, установленных для Марса на основе обширнейших вычислений.

В 1619 г. в сочинении «Гармония мира» Кеплер дал третий закон. Законы Кеплера гласят: 1) Каждая из планет движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. 2) Радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, в равные промежутки времени описывает равные площади. 3) Квадраты времен обращений планет вокруг Солнца относятся, как кубы их средних расстояний от Солнца. Законы Кеплера не сразу нашли свое объяснение. Путь к этому объяснению шел через более углубленное понимание законов тяготения. Хотя Кеплер

имел представление об универсальности силы тяготения и утверждал, что части любой материи притягиваются друг к другу, однако не видел в тяготении планет к Солнцу причину их движения вокруг него. «Он жил в эпоху,— пишет Эйнштейн,— когда не было еще уверенности в существовании некоторой общей закономерности для всех явлений природы. Какой глубокой была у него вера в такую закономерность, если, работая в одиночестве, никем не поддерживаемый и мало понятый, он на протяжении многих десятков лет черпал в ней силы для трудного и кропотливого эмпирического исследования движения планет и математических законов этого движения» [3].

Кеплер выдвигал идею о стремлении тел к сближению и соединению. «В приливах и отливах он видел доказательство того, что Луна притягивающе действует на воду на Земле. Если бы Земля не мешала притягивать воду, то вся морская вода притянулась бы к Луне и улетела» [4, стр. 26]. Он сравнивал тяготение с магнетизмом: «Земля притягивает к себе тела, летающие в воздухе, потому что они прикованы к ней магнитной силой» [4, стр. 28]. Однако на орбитальное движение сила тяжести не влияет. Солнце, говорил он, действует на планеты не притягивающей силой (потому что тогда они должны были бы упасть на Солнце), а силой, направленной сбоку, наподобие круговых магнитных силовых линий, приводящих планеты во вращение. «Тяготение и орбитальное движение две совершенно разные вещи» [5, стр. 283].

Дальнейшее развитие учения о тяготении связано с именами Галилея и Декарта. Во втором дне «Диалогов» (1632), рассматривая возражения, выдвинутые против вращения Земли, Галилей подробно обсуждает вопрос, не улетели ли бы все тела с поверхности движущейся Земли в окружающее пространство. Даже Симпличио начинает понимать сущность вопроса. «Говорил и теперь доскажу остальное. Я прекрасно понимаю, что камень не отделится от земли, так как его удаление вначале было бы столь ничтожно, что во много тысяч раз большим оказалось бы стремление камня двигаться к центру Земли, а этот центр в данном случае тот же, что центр у колеса» [6].

Характеризуя взгляды Галилея, Эйнштейн писал: «Он нашел закон инерции и закон свободного падения в поле тяготения Земли: масса (точнее, материальная точка), на которую не действуют другие массы, движется равномерно и прямолинейно. Вертикальная скорость свободно падающего тела возрастает в поле тяжести пропорционально времени. Сегодня нам может казаться, что только небольшой шаг отделяет результаты Галилея от законов Ньютона. Но все-таки следует отметить, что оба вышеприведенных утверждения Галилея по форме относятся к движению в целом...» [7]. Только дифференциальная форма закона позволила объяснить явления, связанные с тяготением.

Иной была позиция Декарта. В отличие от своих современников Декарт не принимал тяжесть за свойство и внутреннее качество тяжелого тела, в силу которого тело стремится к центру Земли. В июле 1638 г. в письме Мерсенну он отмечал, что одни думают, что тяжесть, как качество, зависит от того, в каком физическом состоянии находится тело, и что одна и та же материя в форме жидкости будет тяжелой, а в форме воздуха становится легкой; другие же считают, что каждое тело более или менее тяжело лишь в зависимости от количества материи, входящей в состав тела, и степени ее сжатости.

«Согласно этим двум мнениям,— писал Декарт,— из коих первое самое распространенное в школах, второе же разделяется преимущественно теми, кто думает знать более, чем заурядные люди, ясно, что абсолютная тяжесть тел всегда одинакова и не изменяется от различия их расстояния от центра Земли» [8, стр. 494—495]. Декарт приводил и мнение тех, которые считают, что всякая тяжесть относительна и что определяющим является масса Земли, притягивающая к себе тела, аналогично тому, как магнит притягивает железо. И аналогично тому, как магнит имеет известную сферу действия, такую же сферу действия они предполагают для действия массы Земли. «Что касается, в частности, меня,— продолжал Декарт там же,— я понимаю природу тяжести отлично от этих трех мнений... Представление мое ничего не решает относительно предложенного вопроса (об изменении тяжести), кроме того, что это есть вопрос факта, который может быть решен лишь настолько, насколько люди могут сделать относительно него опыты. Притом из опытов, произведенных в нашем воздухе, еще нельзя узнать, что должно произойти значительно ниже и ближе к центру Земли или значительно выше, под облаками; а в случае, если тяжесть претерпевает уменьшение или увеличение, маловероятно, чтобы оно следовало всюду той же пропорции» [8, стр. 495].

В другом письме Мерсенну Декарт резко полемизировал с Робервалем, считавшим, что как вся материя, так и каждая ее часть обладают свойством, вследствие которого все части стремятся в одно непрерывное тело. Чтобы представить себе это, писал Декарт, надо допустить, что каждая часть материи одушевлена многими душами, не мешающими одна другой, и принять, что души эти разумны и могут знать, что происходит в местах очень удаленных, и в этих местах оказывать свое действие.

Декарт усматривал причину тяжести в давлении на тела небесного флюида. Вращаясь вместе с Землей, которую он окружает, флюид испытывает центробежную силу. Однако удаление одних тел от Земли возможно в том случае, если другие тела равного объема будут к ней приближаться.

В письме Мерсенну в октябре 1639 г. он описывал, каким образом тонкая материя, вращающаяся вокруг Земли, гонит тяжелые тела к центру, и предлагал следующий опыт: «Наполните какой-нибудь круглый сосуд маленькими кусочками свинца, смешав вместе со свинцом несколько кусков дерева или другого вещества более легкого, чем свинец, и заставьте сосуд этот быстро вращаться около центра. Увидите, что кусочки свинца прогонят куски дерева или камня к центру сосуда, хотя бы они были бы больше по объему, чем маленькие кусочки свинца, изображающие собой тонкую материю...» [8, стр. 500]. Теория тяжести Декарта была опровергнута Христианом Гюйгенсом.

«Декарт,— отмечал Гюйгенс,— лучше своих предшественников осознал, что мы только то можем хорошо понимать в физике, что можем привести к началам, не переходящим за пределы нашего разума,— каковы начала, зависящие от тел, рассматриваемых без качеств, и от их движения. Но так как главная трудность в том, чтобы показать, каким образом столько разнообразных вещей происходят от этих только начал, то это ему не очень удалось во многих частных случаях, между прочим и в случае тяжести» [9].

В 1659 г. Гюйгенс с помощью тщательного анализа движения с точки зрения наблюдателя, участвующего во вращении, показал, что для такого наблюдателя отклонение от инерциального движения в течение короткого промежутка времени может быть аппроксимировано движением, направленным к центру. Тем самым был завершён ход рассуждений Галилея. Гюйгенс исходил из представлений о механической картине мира: в природе все тела состоят из одинаковой материи, без всякого различия качества.

«Чтобы найти понятную причину тяжести,— говорил Гюйгенс,— надлежит усмотреть, как может быть,— предполагая, что все тела природы состоят из той же материи, и не принимая в них никакой склонности сближаться между собой, а только различие в величине, фигурах, движениях,— как, говорю я, может быть, что многие из этих тел тем не менее стремятся прямо к одному центру и группируются вокруг него, что главным образом и составляет явление, которое мы называем тяжестью» [8, стр. 680]. Согласно Гюйгенсу, поскольку тяжесть—это стремление к движению, то она, по всей вероятности, и должна производиться движением. Гюйгенс описал свой опыт, принципиально отличный от опыта Декарта. Он пользовался цилиндрическим сосудом 8—10 дюймов в диаметре с ровным дном, высотой около половины или трети диаметра. Наполнив сосуд водой, он набросал туда кусочки сургуча, покрыл сосуд стеклом, прилегающим непосредственно к воде, и прикрепил стекло к сосуду мастикой. Затем поместил сосуд в центре круглого стола

и привел стол во вращение. Кусочки сургуча, лежавшие на дне и легче следовавшие за движением сосуда, чем вода, собрались по краям. Через некоторое время, когда вода все более вовлекалась в круговое движение, он внезапно стол остановил. Сургуч сбегался к центру, что Гюйгенсу представилось подобием проявления «силы тяжести»; он объяснял это тем, что вода, несмотря на остановку сосуда, продолжала вращение и сохранила стремление удалиться от центра, в то время как сургуч потерял или почти потерял движение, и в жидкости, вращающейся вокруг центра, возникло центростремительное давление на то тело, которое в этом движении не участвовало. Для объяснения тяжести Гюйгенс предположил, что в сферическом пространстве, которое обнимает Землю, находится жидкая материя. «Так как материя эта не может выйти из своего пространства, окруженного другими телами, то я утверждаю,— писал Гюйгенс,— что движение ее должно частью сделаться круговым около центра, но не так, однако, чтобы она вся вращалась в одном направлении, но так, чтобы большая часть ее различных движений происходила на сферических поверхностях вокруг центра сказанного пространства, становящегося через то самое центром Земли» [8, стр. 681—682].

Конструктивная часть гюйгенсовской теории тяготения во многом уступает ее критической части.

Гюйгенс представлял себе, что сферическая фигура Солнца могла образоваться таким же путем, каким образовалась сферическая фигура Земли. Однако он при этом не простирает действия тяжести на такие расстояния, как от Солнца к планетам и от Земли к Луне. Гюйгенс указывал, что этот важный шаг он не проделал потому, что его ум пленили вихри Декарта. Издатели шестнадцатого тома собрания сочинений Гюйгенса приводят замечание Гюйгенса на одной рукописи. Гюйгенс удивлялся, что Ньютон потратил столь много труда для доказательства многих теорем и даже целой теории о движении небесных тел, исходя из «маловероятной и смелой гипотезы» о притяжении частиц силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Это замечание не противоречит тому, что Гюйгенс отметил великие заслуги Ньютона в установлении закона всемирного тяготения. «Видя теперь,— пишет Гюйгенс,— благодаря доказательствам г. Ньютона, что если принять такое тяготение к Солнцу уменьшающимся по сказанному закону, то оно окажется так уравновешивающим центробежные силы планет, что произведет эллиптическое движение, угаданное Кеплером и оправданное наблюдениями, не могу сомневаться, что гипотезы, допущенные относительно тяжести, и основанная на них система г. Ньютона верны. Это тем более вероятно, что в них находим разрешение трудностей, представлявшихся в системе вихрей Декарта» [8, стр. 683].

Одновременно необходимо отметить и влияние Гюйгенса на Ньютона. В конце мемуара «Маятниковые часы» Гюйгенс поместил без доказательств тринадцать теорем о центробежной силе. Эти теоремы стали известны Ньютону. Однако вопрос о решающем значении их в развитии учения о тяготении остается спорным.

В поучении к IV предложению Ньютон писал: «Случай, указанный в следствии 6, имеет место для небесных тел (как то независимо друг от друга отметили Рен, Гук и Галилей)... При помощи предыдущих предложений может также быть выведено отношение центростремительной силы к какой-либо известной силе, например, к силе тяжести. Ибо если тело обращается около Земли по кругу под действием силы тяжести, то эта сила и есть центростремительная. Ее можно определить, на основании следствия 9, по падению тел и по времени оборота и величине дуги, описываемой в заданное время.

Такого рода предложениями Гюйгенс в превосходном своем сочинении: «De Horologio oscillatorio» и сопоставил силу тяжести с центробежными силами обращающихся тел» [10].

К открытию закона тяготения Ньютона привела проблема понимания строения Вселенной, но история этого открытия не получила еще своего разрешения. «Обстоятельства открытия закона тяготения,— пишет Л. Розенфельд,— опять-таки связанные с некоторыми загадками, которые уже давно привлекали внимание историков: после того, как Ньютон впервые пришел к идее тождественности силы тяжести на Земле с силой, которая управляет движениями планет, почему Ньютон не сразу пришел к решению вопроса?

Почему прошло 20 лет, прежде чем он провозгласил закон всемирного тяготения?» [9].

Итальянский ученый Джованни Альфонсо Борелли (1608—1679), ученик Галилея, высказал предположение, что круговое движение небесных тел должно объясняться не только притягательной силой центрального светила, но и центробежной силой, происходящей от инерции этих тел. «Предположим,— писал Д. Борелли,— что планета стремится к Солнцу и в то же время своим круговым движением удаляется от этого центрального тела, лежащего в середине круга. Если обе противоположные силы равны между собой, то они должны уравновеситься; планета не будет в состоянии ни приблизиться к Солнцу, ни отойти от него дальше известных пределов, и в таком равновесии будет продолжать свое обращение около Солнца» [11].

Своим предположением Борелли устранил необходимость в особой вращательной силе, увлекающей спутники вслед за центральным светилом. Предположения Борелли сыграли существенную роль в дальнейшем развитии теории тяготения. В письме Галлею от 20 июня 1686 г. Ньютон писал о заслу-

гах Борелли. Ньютон упоминает также работу Буллиальда («Astronomia philolaica», 1645), в которой указывается на притягательную силу Солнца, уменьшающуюся в прямом отношении к расстоянию.

Ньютон отмечает, что мысль об уменьшении тяжести пропорционально квадрату расстояния возникла у него примерно к 1666 г. Первым необходимым шагом для количественного решения задачи о движении небесных тел вокруг Солнца было вычисление центростремительного ускорения на почти круговой орбите $[A = \omega = \omega^2 R = (\frac{2\pi}{T})^2 R]$, а вторым шагом было принятие для притяжения закона обратных квадратов

$$a : A = R^2 : r^2,$$

где R — радиус орбиты планеты (Луны); r — радиус Земли; A — центростремительное ускорение орбитального движения Луны. Для численного подсчета ускорения a Ньютону требовалось знание радиуса Земли.

В первую очередь необходимо обратиться к количественным расчетам, проведенным Ньютоном.

Приводя расчеты Ньютона, Паннекук писал: «Для длины дуги в 1° он принял значение 60 *миль* (такие данные он нашел в мореходном учебнике — единственном источнике, который был в его распоряжении).

Английская морская миля всегда принималась равной $1'$ дуги на земной поверхности. Считая, что эта «обычная» миля составляет 5280 футов, т. е. равна 4954 парижским футам, он получил ускорение Луны равным 0,0073 *фут/сек²*, откуда ускорение силы тяжести на земной поверхности, находящейся в 60 раз ближе к центру Земли, чем Луна, должно быть в 3600 раз больше, т. е. составить 26,3 *фут/сек²*. Однако еще со времени Галилея было известно, что эта величина составляет 30 *фут/сек²*. Следовательно, это была действительно величина одного и того же порядка, но разность составляла все же $\frac{1}{8}$ полного значения. Как известно, разочарованный этим Ньютон временно оставил эту блестящую мысль и обратился в следующие годы к математическому изучению разработанной им теории флюксий и оптическим исследованиям по теории цветов» [5, стр. 285].

Паннекук отмечает при этом, что Ньютон мог получить более правильное значение, ибо результат Снеллиуса, установившего, что длина дуги земного меридиана в 1° равна 69 английским милям, можно было обнаружить в английских книгах. Причина, указанная Паннекуком, лишь одна из многих причин, в силу которых Ньютон воздержался от провозглашения открытого им закона тяготения. В последнее время Л. Розенфельд

предпринял попытку проследить историю вопроса более детально, опираясь на не известные ранее материалы.

В 1659 году Гюйгенс открыл закон центробежного ускорения.

В 1673 г. этот закон был опубликован в приложении к «Маятниковым часам». Экземпляр книги был получен Ньютоном в том же году. В своем ответном письме Ньютон намекнул на то, что он давно уже знает все относящееся к центробежной силе. Анализируя имеющиеся материалы, и, в частности, расшифрованный Херивелем отрывок бумаги, где Ньютон делал числовые расчеты, Л. Розенфельд пишет: «Мы видим здесь, как Ньютон применяет свое недавно приобретенное знание закона центробежных сил для того, чтобы вычислить эту силу на поверхности Земли и сравнить ее с силой тяжести. Этот драгоценный документ дает окончательный ответ на вопрос, какое значение для радиуса Земли Ньютон принимал в его знаменитом «Размышлении под яблоней». В только что упомянутых вычислениях Ньютон достаточно естественным образом заимствует необходимые ему значения из той книги, которую он изучал, а именно оно указано равным 3500 итальянским лирам» [9]. Л. Розенфельд утверждает, что Ньютон в то время не обратил внимания на недостаточную точность значения радиуса Земли, приведенную Галилеем. Розенфельд пришел к выводу, что на протяжении двадцати лет, предшествовавших окончательной формулировке закона тяготения, Ньютон многократно обращался к этой проблеме. В середине 1687 г. была закончена работа над «Началами». Для Ньютона закон обратных квадратов стал несомненным лишь после того, как им была доказана теорема о притяжении сферических оболочек (1685), поэтому до этого времени уточнение значения радиуса Земли было для него не столь существенным.

«Он не ожидал, — пишет Розенфельд, — что ошибка в том значении, которое он выбрал, столь велика, и был склонен к тому, чтобы рассматривать расхождение в данном случае, как связанное с действительным физическим эффектом. Только после того как Ньютон открыл теорему о притяжении сфер, он заподозрил, что указанное расхождение является существенным, и проверил что оно действительно, если принять для радиуса Земли значение Пикара. Однако в это время он уже начал писать «Начала» и поэтому исправление ошибки уже не оказало влияние на его решение опубликовать результаты своих исследований» [9].

Эванс полагает, что Ньютон пытался объяснить тяготение, опираясь на концепцию о действии на расстоянии и на гипотезу об эфире. Он полагает, что именно увлечение гипотезой об эфире задержало на двадцать лет опубликование закона всемирного тяготения [12]. Хотя возможно, что закон обратных квадратов был известен и Гуку, но нет сомнения, что Ньютон — творец

классической теории тяготения. Им завершено новое направление в учении о тяготении, связанное с именами Коперника, Кеплера, Галилея, Гюйгенса, Роберваля и многих других.

Гук изложил свои идеи о движении планет в мемуаре «An attempt to prove the motion of the Earth» (1674). Объяснение системы Вселенной Гук дает исходя из трех основных законов. «1) Все тела обладают тяжестью не только по отношению к собственному центру, но и относительно друг друга в пределах круга их действия. 2) Все тела, имеющие простое прямолинейное движение, продолжают двигаться по прямой линии, если только какая-нибудь сила их постоянно не отклоняет от этого направления, заставляя описывать круг, эллипс или другую сложную кривую. 3) Притяжение тем сильнее, чем ближе находится притягиваемое тело» [13]. Хотя Гук прибавил, что им не исследован подробнее закон, по которому происходит притяжение, тем не менее, в дальнейшем он затеял спор о приоритете в открытии закона притяжения [14].

Галлей (1656—1742) сделал вывод из третьего закона Кеплера, что притяжение Солнца должно убывать пропорционально квадрату расстояния [15]. Он стремился определить пути планет, но не смог преодолеть возникшие математические трудности. В 1683 г. он в присутствии Врена спросил у Гука его мнение по этому вопросу. Хотя Гук стал утверждать, что задача им решена, однако ни устного, ни письменного решения ее не представил.

В 1684 г. Галлей при посещении Ньютона в Кембридже, убедился, что задача Ньютоном решена полностью.

Ньютоновская теория всемирного тяготения постепенно вытеснила вихревую теорию. В основных учебниках физики, наиболее распространенных в Англии, еще придерживались учения Декарта, но с дополнениями, в которых излагалась теория Ньютона. Однако в университетах в начале XVIII в. господствовало учение Ньютона. Проникновение теории Ньютона за пределы Англии началось еще при его жизни, но особенно усилилось в 40-х и 50-х годах XVIII в. В своих «Письмах из Лондона об английском» Вольтер отмечал, что француз, который попадает в Лондон, обнаруживает сильные изменения в философии.

«...В Париже вы видели вселенную, наполненную круговыми вихрями из тончайшей материи, в Лондоне вы ничего этого не видите. У нас давление Луны вызывает приливы на море, у англичан море притягивается к Луне... Кроме того, вы можете заметить, что Солнце, которое в это дело не вмешивается, здесь вносит в него свою четвертую часть. У наших картезианцев все происходит благодаря давлению, которое, правда, само непонятно. У месье Ньютона все происходит благодаря притяжению, причина которого известна ничуть не лучше» [5, стр. 322—323].

В 1733 г. в сочинении «Элементы философии Ньютона» Вольтер излагает теорию тяготения Ньютона.

В дальнейшем преимущественное развитие получили проблемы, связанные с применением ньютоновской теории тяготения к астрономии и геодезии. Декартова теория тяготения не могла быть применена в этих случаях, требовавших точных количественных расчетов.

В 1743 г. Клеро (1713—1765) опубликовал книгу «Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики», в которой содержатся теоремы, устанавливающие связь между распределением силы тяжести на поверхности Земли и некоторыми параметрами, характеризующими ее форму и угловую скорость ее вращения [16]. Ж. Л. Даламбер (1717—1783) обосновал теорию возмущения и дал строгое объяснение теории предварения равноденствия и нутации.

Развитие теоретической астрономии шло по пути, намеченному Ньютоном и полностью опиралось на его теорию тяготения, но поскольку сама природа тяготения оставалась загадочной, продолжали свое существование скрытые надежды, что проблема тяготения будет когда-либо разрешена в картезианском духе. Во второй половине XVIII в. стало более очевидным, что отсутствие конструктивных элементов в декартовой теории тяготения не позволяет с ее помощью получать какие-либо существенные результаты, в то время как конструктивные элементы феноменологической теории Ньютона позволяют решать все более сложные задачи.

В 1745—1746 гг. Л. Эйлер (1707—1783) вычислил возмущения Луны и предложил соответствующие лунные таблицы. Клеро и Даламбер опубликовали независимо друг от друга лунные таблицы, которые как и эйлеровские, не давали точного движения Луны. Эйлер при этом даже обратился к некоторым элементам декартовой теории (сопротивления среды — эфира), но в дальнейшем недостатки лунных таблиц были исправлены на основе ньютоновской теории. Ньютоновская теория тяготения стала фундаментом теоретической астрономии. Характерно, что при всем этом Эйлер многократно высказывался против концепции дальнодействия. «Если бы мы увидели, что повозка следует за лошадьми, хотя они не впряжены в нее и хотя не видно ни веревки, ни чего-либо другого, что могло бы поддерживать связь между повозкой и лошадьми, то мы не стали бы говорить, что повозку тянут лошади. Вернее всего мы были бы склонны полагать, что повозка увлекается некоей силой, хотя ее не видно, если только это не проделки какой-то чародейки... Однако господа англичане... утверждают, что таково свойство, присущее всем телам, притягиваться между собою, что это свойство столь же естественно для них, как и протяженность...» [17]. Эйлер стремился к механистическому объяснению сил тяготения.

В другом месте он писал: «Утверждают, что тела влекутся к Земле не в силу какого-либо свойственного им инстинкта, а притягиваются к ней силой притяжения самой Земли... Представляют себе дело таким образом, как если бы Земля испускала по всем направлениям силы, которые охватывают окружающие тела и направляют их к Земле; при этом... предполагают, что упомянутое испускание происходит не при посредстве какой-либо промежуточной среды, но что оно совершенно так же имело бы место, если бы в промежутке между Землей и телами была полностью удалена какая бы то ни было материя...» [18]. Эйлер считает более правдоподобным, что сила тягести происходит в результате действия «тонкой материи». Эйлер полагает, что там, где движется поток эфирной материи, давление эфира понижается и что упругость эфира убывает обратно пропорционально расстоянию от центра Земли. Уменьшение упругости должно приводить к гидростатическому давлению. Это давление прижимает погруженные в эфир тела по направлению к центру Земли.

В 1777 г. Жозеф Луи Лагранж (1736—1813) ввел понятие потенциала, градиент которого дает силу тяготения. Лаплас (1749—1827) развил методы небесной механики. Он доказал, что закон всемирного тяготения полностью объяснит движение планет, если тщательно представить их взаимные возмущения математическими рядами. В его пятитомном труде «Traité de mécanique céleste» движения в солнечной системе рассматриваются как механические задачи, базирующиеся на законе всемирного тяготения. В 1782 г. он вывел для потенциала дифференциальное уравнение в частных производных $\Delta\varphi=0$. Пуассон (1781—1840) видоизменил уравнение Лапласа, придав ему вид $\Delta\varphi=4\pi\rho$. Дифференциальное уравнение Лапласа — Пуассона есть обобщенное выражение ньютоновского закона тяготения.

Стремление объяснить тяготение близкодействующими силами временами возобновлялось. Лесаж [19] выдвинул гипотезу о мельчайших твердых частицах, движущихся с огромными скоростями по всевозможным направлениям. Он полагал, что видимое притяжение материи можно объяснить ударами частиц. Эти частицы столь малы, что весьма редко сталкиваются между собой. Столкновения же частиц с телами происходят весьма часто. Тело, изолированное от множества других тел, испытывает толчки по всем направлениям в одинаковой мере, не получая преобладающего импульса в одну из сторон. При наличии двух тел часть потока заслоняется каждым из них. В результате появляется некоторая равнодействующая сила, толкающая одно тело к другому. Дополнительные, специально приспособленные предположения позволяют Лесажу получить закон тяготения Ньютона. Лесаж стремился согласовать атомистику древних с воззрениями Ньютона, не привлекая понятие силы, чуждое атомистам. Он пытался доказать, что древняя атомистика, правиль-

но интерпретируемая, может привести к ньютоновской физике. Физика мало обращала внимания на сущность его теорий. В конце XIX в. Прево, Лерэ [20], Шрамм [21], Изенкраге [22] и др. пытались без особых успехов развивать и модифицировать гипотезу Лесажа. Вопрос о мгновенном действии гравитации многократно обсуждался во второй половине XIX в. [23].

Известное влияние на трактовку закона тяготения оказали модификации электродинамических законов.

Цельнер полагал, что закон Вебера для потенциала

$$P = \frac{Cm_1m_2}{r} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right]$$

является основным законом для всякого дальнего действия. Были проведены расчеты планетных движений, исходя из рассматриваемой формулы [24]. Тиссеран рассмотрел возможность использования закона электродинамического взаимодействия Гаусса для случая сил взаимного притяжения масс

$$K = \frac{Cm_1m_2}{r^2} \left\{ 1 + \frac{2}{c^2} \left[\left(\frac{d(x_1 - x_2)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d(y_1 - y_2)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d(z_1 - z_2)}{dt} \right)^2 \right] - \frac{3}{2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right\}$$

и получил для перигелия Меркурия дополнительно $28''$ [25]. Леви из закона Римана для потенциала

$$P = \frac{Cm_1m_2}{r} \left\{ 1 - \frac{1}{c^2} \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \right] \right\}$$

(x, y, z — координаты m_1 , по отношению к m_2) получил удвоенное значение по сравнению с полученным из закона Вебера. Леви предложил комбинацию римановского и веберовского законов

$$P = P_{\text{Вебера}} + \alpha (P_{\text{Римана}} - P_{\text{Вебера}}) = \frac{Cm_1m_2}{r} \left\{ 1 - \frac{1}{c^2} \left[(1-\alpha) \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \alpha \left(\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \right) \right] \right\}.$$

Г. А. Лоренц, как и многие другие, стремился видоизменить закон Ньютона. Многие шли по пути Лапласа, который закону Ньютона придал форму:

$$K = \frac{Cm_1m_2}{r^2} e^{-\alpha r}.$$

Например, К. Нейман придал потенциалу вид:

$$P = Cm_1m_2 \left(\frac{Ae^{-\alpha r}}{r} + \frac{Be^{-\beta r}}{r} \right),$$

но эти законы приводили к многочисленным трудностям при вычислении перигелия Меркурия.