

Г л а в а I. ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА

1. Введение. При изучении движения небесных тел закон всемирного тяготения Ньютона всегда будет иметь фундаментальное значение. Вместе с общими законами динамики он составляет незыблемую основу небесной механики, позволяющей с величайшей точностью объяснить и предвычислить подавляющее большинство движений, наблюдавшихся в Солнечной системе. Наряду с высокой точностью этот закон также поразительно универсален, поскольку он в одинаковой степени применим к падению тел у земной поверхности и обращению планет вокруг Солнца, к движению двойных звезд и звездных систем, к Галактике в целом и, вероятно, также к взаимодействию между галактиками.

Формулировка закона Ньютона отличается большой общностью и не связана с каким-либо конкретным представлением о природе или механизме взаимного притяжения между телами. Это придает закону Ньютона формальный характер, но вместе с тем определяет надежность и широкую его применимость.

Оставляя вопрос о природе тяготения открытым, Ньютон развивал учение о движении небесных тел по образцу геометрии. Он стремился вывести движения небесных тел путем математической дедукции из небольшого числа твердо установленных и тщательно сформулированных общих принципов, играющих в его теории роль аксиом или постулатов. Последние же, в свою очередь, должны быть индуктивно найдены из наблюдений и опытов, т. е. обоснованы эмпирически путем тщательного изучения и анализа действительных движений в природе. С особенной ясностью и определенностью этот метод описан Ньютоном в последнем вопросе его «Оптики»: «Вывести из явлений два или три общих принципа движения и затем изложить, как из этих ясных принципов вытекают свойства и действия всех вещественных предметов,— вот что было бы очень большим шагом вперед в философии, хотя бы причины этих принципов и не были еще открыты» [1].

Ставя своей целью разработку математической теории движения небесных тел, Ньютон выдвигал на первый план точную количественную формулировку закона всемирного тяготения, оставляя открытый вопрос о физической природе гравитационных взаимодействий. К гипотезам о механизме этих взаимодействий он проявляет

сдержанное, порой даже несколько высокомерное отношение, выразившееся в его знаменитом «*hypotheses non fingo*». Во втором издании «Начал» в «Общем поучении» сказано: «До сих пор я изъяснил небесные явления и приливы наших морей на основании силы тяготения, но я не указывал причины самого тяготения. Эта сила проходит от некоторой причины, которая проникает до центра Солнца и планет без уменьшения своей способности и которая действует не пропорционально поверхности частиц, на которые она действует (как это обыкновенно имеет место для механических причин), но пропорционально количеству твердого вещества, причем ее действие распространяется повсюду на огромные расстояния, убывая пропорционально квадратам расстояний... Причину этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам, и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря» [2].

Довольствуясь эмпирическим обоснованием закона тяготения, Ньютон в то же время неоднократно указывал на возможность механического объяснения гравитации с точки зрения гипотезы эфира, хотя это объяснение не казалось ему, по-видимому, убедительным и не играло существенной роли в его концепции. Вместе с тем он не поддерживал и идею о первичности гравитации, изложенную Котсом в предисловии ко второму изданию «Начал» [2]. Согласно этой идеи, тяготение представляет собой неотъемлемое свойство всякой материи, проявляющееся в ее способности непосредственно действовать на сколь угодно больших расстояниях; будучи первичным, это свойство не допускает дальнейшего объяснения и является неким непознаваемым началом. В известном письме Бентлею от 25 февраля 1693 г. Ньютон писал: «Непостижимо, чтобы неодушевленная грубая материя могла без посредства чего-либо нематериального действовать и влиять на другую материю без взаимного соприкосновения, как это должно бы происходить, если бы тяготение в смысле Эпикура было существенным и врожденным в материи. Предполагать, что тяготение является существенным, неразрывным и врожденным свойством материи, так что тело может действовать на другое на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо передавая действие и силу,— это, по-моему, такой абсурд, который немыслим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах. Тяготение должно вызываться агентом, постоянно действующим по определенным законам» [3].

На основе закона тяготения Ньютона выросло обширное и детально разработанное учение — классическая небесная механика, значение и успехи которой общеизвестны. Однако триумфальное

развитие небесной механики сопровождалось многочисленными попытками внести те или иные малые поправки в точную форму закона тяготения, а также появлением ряда гипотез о механизме гравитационных взаимодействий. Эти попытки, связанные с отдельными трудностями небесной механики и с различными общими соображениями, оставались в течение двух столетий безуспешными, и только создание теории относительности привело к глубокому пересмотру концепции Ньютона.

2. Закон тяготения Ньютона как следствие законов Кеплера. По представлению Ньютона, закон тяготения является одним из немногих общих принципов, из которых «вытекают свойства и действия всех вещественных предметов». Однако, в свою очередь, этот закон должен быть индуктивно выведен из «явлений», т. е. из наблюдаемых в природе движений. Такими «явлением» служили, как известно, особенности движения в задаче двух тел, найденные эмпирически на основе многолетних наблюдений планет Солнечной системы и получившие выражение в трех законах Кеплера. Первые два закона Кеплера относятся к гелиоцентрическому движению каждой отдельно взятой планеты, третий связывает средние расстояния планет от Солнца с периодами их обращения. В полярных геоцентрических координатах законы Кеплера можно выразить равенствами

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \phi}; \quad r^2 \dot{\phi} = C; \quad \frac{a^3}{T^2} = f, \quad (1.2,1)$$

где p , e — фокальный параметр и эксцентриситет планетной орбиты, C — постоянная площадей, равная удвоенной секториальной скорости планеты, a — среднее расстояние от Солнца, T — период обращения планеты, f — постоянная.

Восстановим в общих чертах переход от законов Кеплера (1.2,1) к закону тяготения. Ограничеваясь случаем системы двух тел, будем принимать во внимание взаимодействие данной планеты с Солнцем, пренебрегая действием других планет.

Отнесем изучаемое движение двух тел к инерциальной системе отсчета и обозначим радиусы-векторы точечных масс M , m соответственно через \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 . Уравнения движения имеют вид

$$M \frac{d^2 \mathbf{r}_1}{dt^2} = -\mathbf{F}; \quad m \frac{d^2 \mathbf{r}_2}{dt^2} = \mathbf{F},$$

где через \mathbf{F} обозначена сила, приложенная к массе m .

Перейдем к системе отсчета, связанной с массой M , т. е. к гелиоцентрическим координатам. Введя относительный радиус-вектор $\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$, получим уравнение относительного движения

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{m+M}{mM} \mathbf{F}. \quad (1.2,2)$$