

В результате этой грандиозной работы было установлено, что закон Ньютона представляет движение пяти внешних планет совершенно точно; иначе говоря, отклонения нигде не выходят за пределы ошибок наблюдений. Этим было доказано, что все невязки с наблюдениями прежних таблиц движения этих планет были лишь следствием неполноты аналитических теорий, положенных в основу этих таблиц.

Начиная с 1960 г. эфемериды внешних планет даются астрономическими ежегодниками на основании этих вычислений

### § 3. Движение внутренних планет

Гравитационные теории движения четырех внутренних планет, исчерпывающим образом использующие наблюдательный материал, впервые были даны Леверрье в 1858—1861 гг.

Опираясь на меридианные наблюдения Солнца, полученные в 1750—1850 гг. в Гринвиче, Париже и Кенигсберге, Леверрье построил прежде всего теорию движения Земли, являющуюся основой изучения движения всех других планет. В частности, исследование движения Земли позволило фиксировать с большою точностью массу Венеры, существенно важную для вычисления возмущений Меркурия. Теория Меркурия представила, как уже было отмечено, наибольшие затруднения: для векового движения перигелия этой планеты наблюдения давали значение, несомненно, отличающееся от теоретического.

Леверрье нашел, что прогрессивное увеличение долготы перигелия Меркурия за юлианское столетие, вызываемое притяжением других планет, выражается следующими числами:

от действия	Венеры . . .	+280",64
»	» Земли . . .	+ 83 ,61
»	» Марса . . .	+ 2 ,55
»	» Юпитера . . .	+152 ,59
»	» Сатурна . . .	+ 7 ,24
»	» Урана . . .	+ 0 ,14
»	» Нептуна . . .	+ 0 ,06

В совокупности это дает увеличение долготы перигелия на 526",83 в столетие. Между тем дискуссия наблюдений (особо важное значение здесь имели наблюдения прохождений Меркурия по диску Солнца) показала, что прогрессивное перемещение перигелия Меркурия в действительности равно 565",1 в столетие, т. е. на 38",3 больше только что указанного теоретического значения.

Приведенная табличка показывает полную невозможность объяснить эту невязку неточностью принятых масс планет. Содержащиеся в ней числа пропорциональны массам соответствующих планет; чтобы эти числа довести до нужной вели-

чины, пришлось бы массы планет увеличить совершенно недопустимым образом.

Нужно отметить, что из наблюдений непосредственно получается не вековое изменение долготы перигелия  $D_{i\pi}$ , а произведение этой величины на эксцентриситет планеты. Так как для Меркурия  $e=0,20561$ , то найденная Леверрье невязка, по существу, равна  $7'',88$ . Она смещает положение Меркурия в его орбите всего лишь на  $0'',08$  в год.

Аналогичное затруднение Леверрье встретил в теории движения Марса: к теоретической величине векового возмущения перигелия Марса ему пришлось придать эмпирическую поправку, равную  $25'',15$ . Но здесь это произошло потому, что он не решился ввести в массу Земли соответствующую поправку, хотя такая поправка ясно вытекала из всей совокупности наблюдений не только Марса, но и Венеры. Леверрье был слишком убежден в исключительной точности значения массы Земли (вместе с Луной), равного  $1/354936$ , вытекавшего из значения параллакса Солнца  $8'',5776 \pm 0'',0370$ , которое Энке получил (1824) из обработки наблюдений прохождений Венеры 1761 и 1769 г. Четыре десятичных знака, данные Энке, до такой степени импонировали, что лишь через 40—50 лет для параллакса Солнца стали употребляться значения, более близкие к величине  $8'',80$ , принятой в настоящее время. Если взять массу Земли (вместе с Луной), соответствующую этому значению, т. е.  $1/328272$ , то эмпирическая поправка векового движения перигелия Марса, найденная Леверрье, становится равной  $7''$ . Поскольку для Марса  $e=0,09333$ , то невязка в величине  $eD_{i\pi}$ , непосредственно выводимой из наблюдений, составляет всего  $+0'',65$  в столетие.

Конец XIX в. ознаменовался еще более грандиозными работами по созданию гравитационной теории движения четырех внутренних планет. Эти работы были выполнены С. Ньюкомом силами руководимого им Бюро Американского астрономического ежегодника (American Ephemeris) при Вашингтонской обсерватории\*).

Помимо наблюдательного материала, уже использованного Леверрье, Ньюком имел в своем распоряжении четыре новых прохождения Меркурия и два прохождения Венеры в 1874 и 1882 годах, не говоря уже о большом количестве новых высокоточных меридианных наблюдений. Для интервала времени с 1750 по 1892 г. он имел свыше 40 000 наблюдений Солнца, 5000 наблюдений Меркурия, около 12 000 — Венеры и 4000 — Марса.

\*) Созданные Ньюкомом теории движения Меркурия, Венеры, Земли и Марса, основанные на этих теориях таблицы, а также все подготовительные мемуары помещены в томах I—VII (1882—1898) основанного им издания: *Astronomical Papers prepared for the use of the American Ephemeris and Nautical Almanac*.

Таблицы планет, созданные Леверрье, не были основаны на единой системе масс, так как по мере продвижения работы он придавал массам поправки, полученные при помощи уже законченных таблиц. Ньюком поставил себе целью устранить этот недостаток. С другой стороны, в отличие от Леверрье, опиравшегося при нахождении масс исключительно на вековые возмущения планет, Ньюком широко использовал здесь и другие возможности: некоторые периодические возмущения, изучение движений спутников, малых планет и даже комет.

В небольшом сочинении [Ньюком, 1895b], посвященном подведению итогов всех этих работ, окончательное сопоставление теорий движения внутренних планет с наблюдениями было выполнено следующим образом. Из условных уравнений, основанных на невязках между наблюдаемыми и вычисленными положениями планеты, он получает поправки не только элементов, но и вековых возмущений:

$$D_t e; e D_t \pi; D_t i; \sin i D_t \Omega. \quad (3.1)$$

Найденные таким образом эмпирические значения этих четырех величин он сравнивает с их теоретическими значениями, даваемыми уравнениями Лагранжа (§ 13, гл. XVI). Это дает возможность судить, насколько точно движение планеты представляется законом Ньютона.

Оказалось, что разность между эмпирическими и теоретическими значениями величин (3.1) практически равна нулю во всех случаях, за исключением лишь трех следующих: она равна  $+8''.68 \pm 0''.43$  для  $e D_t \pi$  у Меркурия;  $+0''.60 \pm 0''.17$  для  $\sin i D_t \Omega$  у Венеры и  $+0''.75 \pm 0''.35$  для  $e D_t \pi$  у Марса.

Принимая во внимание указанные здесь вероятные ошибки (по приблизительной и скорее заниженной оценке Ньюкома), можно с полной несомненностью утверждать наличие невязки только в вековом движении перигелия Меркурия. Это вековое движение получается равным \*)  $+42''.2 \pm 2''.2$ , что очень близко к величине  $38''.3$ , найденной Леверрье. Невязка в движении перигелия Марса, равная  $+8''.04$ , находится также в хорошем согласии с тем, что получилось бы у Леверрье при употреблении более точных значений масс.

Попытки объяснить невязки в движениях перигелиев Меркурия и Марса (а также узла Венеры) притяжением каких-то новых масс или перераспределением уже известных нам космических масс были неудачны. С полной несомненностью было установлено, что разработанная еще Леверрье гипотеза интра-меркуриальной планеты должна быть оставлена — отсутствие такой

\*) В указанные нами для Меркурия величины включены некоторые поправки, вытекающие из вычислений Ньюкома, но им не сделанные. Ньюком дает  $8''.48$  и  $41''.2$ .

планеты было окончательно доказано фотографическими наблюдениями, делавшимися во время полных солнечных затмений.

Была сделана попытка заменить одну планету кольцом настолько мелких планетоидов, чтобы их нельзя было видеть в отдельности. Общая масса такого кольца может быть подобрана так, что она будет производить нужное перемещение перигелия Меркурия, не оказывая такого влияния на перигелии других планет, которое могло бы быть обнаружено современными наблюдениями. Но для того, чтобы это кольцо не производило не наблюдаемого нами перемещения узла Меркурия, оно должно находиться в плоскости его орбиты. А в этом случае оно необходимо произведет такое движение узла Венеры, которое противоречит наблюдениям. Таким образом, эту гипотезу также пришлось оставить. Не была удачной и попытка Ньюкома поместить гипотетическое кольцо планетоидов между орбитами Меркурия и Венеры. Можно упомянуть еще гипотезу не вполне сферического распределения солнечных масс.

Наиболее обещающей в течение некоторого времени оказалась гипотеза, детально разработанная Зеелигером (H. v. See-linger) в 1906 г. Он показал, что межпланетной материи, производящей явление зодиакального света, можно приписать такое распределение масс, которое полностью воспроизводит все установленные Ньюкомом невязки, не нарушая согласия между гравитационной теорией и наблюдениями в других вековых эффектах, если только еще придать эклиптической системе координат надлежащее вращение по отношению к инерциальной системе. Однако успех этой гипотезы был обусловлен прежде всего большим числом произвольных параметров, которые она вводила и которые подбирались так, чтобы получить наилучшее согласие с наблюдениями. Но когда важнейший из этих параметров — плотность вещества зодиакального света — был найден совсем другим путем, а именно из фотометрических измерений, то для него получилась величина в  $10^8$  раз меньшая той, которая нужна для объяснения аномалии в движении перигелия Меркурия. Таким образом, все попытки объяснить рассматриваемые аномалии, не меняя закона Ньютона, оказались безрезультатными.

Идея внести соответствующее изменение в закон тяготения была выдвинута Асафом Холлом (Asaph Hall) в 1895 г. Для силы взаимного притяжения двух материальных частиц с массами  $m$  и  $m'$ , находящимися на расстоянии  $r$ , он предложил взять выражение

$$fmm'r^{-2-\sigma},$$

где поправка  $\sigma$  очень мала.

Легко показать, что в этом случае движение планеты вокруг Солнца происходило бы по орбите, очень близкой к равномерно

вращающемуся эллипсу, причем угол между наименьшим радиусом-вектором  $r_1$  и наибольшим  $r_2$  выражался бы формулой

$$\Theta = \frac{180^\circ}{\sqrt{1-\sigma}} \left[ 1 + \frac{\sigma(3+\sigma)}{24} \left( \frac{r_2-r_1}{r_2+r_1} \right)^2 + \dots \right]. \quad (3.2)$$

Если начальные условия изменять так, чтобы  $r_2 \rightarrow r_1$ , т. е. чтобы орбита приближалась к круговой, то

$$\lim \Theta = \frac{180^\circ}{\sqrt{1-\sigma}}.$$

Этот результат был известен еще Ньютону, который воспользовался им для доказательства полной строгости равенства  $\sigma=0$ , опираясь на установленный опытом факт неподвижности перигелиев планет.

Холл предложил определить поправку  $\sigma$  при помощи обнаруженного движения перигелия Меркурия.

Для векового движения перигелия планеты формула (3.2) дает

$$D_t \pi = \frac{n}{\sqrt{1-\sigma}} \left[ 1 + \frac{\sigma(3+\sigma)}{24} e^2 + \dots \right] n,$$

где через  $e$  и  $n$  обозначены эксцентриситет и среднее вековое движение этой планеты.

Так как для Меркурия (1900,0)

$$e = 0,2056122, \quad n = 538\ 106\ 667'',$$

то при  $D_t \pi = 42'',4$  из предыдущего равенства получаем

$$\sigma = 0,000\ 0001552.$$

Окончательно, при составлении таблиц движения Меркурия, Венеры, Земли и Марса, Ньюком принял

$$\sigma = 0,000\ 000\ 1612 \quad (3.3)$$

и, сообразно с этим, ввел дополнительные эмпирические поправки вековых движений перигелиев этих планет, равные соответственно

$$43'',37; \quad 16'',98; \quad 10'',45; \quad 5'',55. \quad (3.4)$$

Он стремился при этом наилучшим образом удовлетворить наблюдениям не только Меркурия, но и других планет.

Составленные Ньюкомом таблицы движения Меркурия, Венеры и Земли служили с 1901 по 1959 г. включительно для вычисления эфемерид этих планет в астрономических ежегодниках. Его таблицы движения Марса, заменившие в ежегодниках, начиная с 1903 г., таблицы Леверрье, скоро стали давать замет-

ные расхождения с наблюдениями. Пересмотр построенной Ньюкомом теории движения Марса, выполненный Россом [1917], позволил внести в нее исправления и изменения, существенно улучшившие согласие с наблюдениями.

Но элемент эмпиризма увеличился при этом еще больше, поскольку Росс ввел в таблицы эмпирические значения вековых изменений элементов.

Когда Ньюком ввел в теорию движения планет эмпирическую поправку (3.3) к закону тяготения, то эта поправка дала также хорошее представление невязок в вековых движениях перигея и узла Луны, обнаруженных Ганзеном [1862—1864]. Это служило как бы подтверждением гипотезы Холла. Работы Брауна показали, однако, что рассматриваемые невязки являлись лишь следствием несовершенства теории Ганзена. Более того, созданная Брауном теория движения Луны показала, что для получения согласия с наблюдениями необходимо, чтобы  $\sigma$  удовлетворяло условию  $\sigma < 0,00000004$ . Таким образом, одно и то же значение  $\sigma$  не может представить как движения планет, так и движение Луны.

Задача объяснения аномалий в вековых движениях планет, близких к Солнцу, была решена открытием закона тяготения Эйнштейна, о котором будет сказано в следующем параграфе \*).

Это обстоятельство и открытие неравномерности вращения Земли (§ 1), так же как и большое количество новых наблюдений, сделали целесообразным повторение сопоставления гравитационных теорий движения внутренних планет с наблюдениями. Эта огромная работа была выполнена для Меркурия Клеменсом [1943] и для Венеры — Данкомом [1956].

Оказалось, что теория Ньюкома с исправленными элементами, после удаления эмпирических поправок (3.4) и введения поправок, соответствующих переходу от закона Ньютона к закону тяготения Эйнштейна, очень хорошо представляет наблюдения: теоретические значения вековых изменений элементов во всех случаях совпадают, в пределах точности наблюдений, с их эмпирическими значениями. В частности, совершенно отсутствует упомянутая выше аномалия в движении узла Венеры.

Теория Марса была заново построена Клеменсом в 1947—1957 гг. Он употребил для этого ту форму метода Ганзена, которая была использована Хиллом в созданных им теориях Юпитера и Сатурна (§ 2). Для Марса также получилось полное согласие между гравитационной теорией и наблюдениями.

---

\*) Дорелятивистские попытки объяснения аномалий в движениях планет и Луны подробно рассмотрены в весьма содержательном сочинении Шази [1928].