

Переход от всемирного времени, т. е. времени, измеряемого вращением Земли, к эфемеридному времени, осуществляется при помощи сравнения наблюдаемых положений Луны с ее положениями, даваемыми чисто гравитационной теорией *).

§ 2. Гравитационная теория движения планет.

Внешние планеты

Рассмотрим теперь историю создания гравитационной теории движения планет.

Она начинается тремя мемуарами Эйлера, премированными Парижской Академией наук в 1748, 1752 и 1756 гг. **).

В двух первых из этих мемуаров Эйлер делает попытку объяснить отклонения в движениях Юпитера и Сатурна от законов Кеплера. Это была весьма актуальная в то время проблема, тесно связанная с решением вопроса, сохраняет ли закон тяготения свою форму и для очень больших расстояний. Вот почему эта проблема три раза подряд — в 1748, 1750 и 1752 гг. — предлагалась на соискание премии. Работы Эйлера, премированные в 1748 и 1752 гг. (в 1750 г. конкурс не состоялся), хотя и не решали поставленную задачу, содержали весьма важные результаты. В них был сделан первый, но уже значительный шаг в деле приближенного решения дифференциальных уравнений, представляющих возмущенное движение планет. В частности, здесь были заложены основы методов разложения возмущающих сил в тригонометрические ряды, явившиеся ключом всего дальнейшего прогресса в этой области. Из полученных Эйлером результатов следует отметить открытие вековых возмущений эксцентриситетов, наклонов, долгот перигелиев и долгот узлов.

Задача, решавшаяся Эйлером в мемуаре, премированном в 1756 г., заключалась в усовершенствовании теории движения Земли. Здесь впервые была построена гравитационная теория движения планеты с точностью до первых степеней возмущающих масс.

Созданные Эйлером методы были развиты и существенно усовершенствованы Лагранжем (J. L. Lagrange, 1736—1813) и Лапласом. Открытие Лапласом долгопериодических возмущений, возникающих в тех случаях, когда при интегрировании тригонометрических членов появляются малые делители, позволило,

*) Эфемерида Луны, вычисленная по разложениям теории Брауна с учетом рекомендаций VIII Генеральной Ассамблеи Международного Астрономического Союза (Рим, 1952), в результате которых был исключен так называемый Большой эмпирический член и уточнена поправка за аберрацию, носит название «Улучшенной эфемериды Луны» [Лунные эфемериды 1952—1959].

**) Они были опубликованы в издававшемся Парижской Академией наук сборнике: *Recueil des pièces qui ont remporté les prix de l'Académie des Sciences*. Paris, t. VI (1750), t. VII (1769), t. VIII (1771).

наконец, объяснить (в 1787 г.) неправильности в движениях Юпитера и Сатурна. Это было новым большим триумфом закона Ньютона.

Рассеяв, таким образом, последние сомнения в полной строгости закона Ньютона, Лаплас приступил к построению вытекающей из этого закона теории движения всех планет, основанной на единой системе констант. Решение этой основной для всей астрономии задачи, данное Лапласом в третьем томе «Небесной механики» (1802), послужило основой для многочисленных таблиц движения планет. Некоторые из этих таблиц употреблялись для вычисления астрономических ежегодников до второй половины XIX в. *). Сравнение этих таблиц с наблюдениями показало, что теории Лапласа давали удовлетворительное представление движения всех планет, кроме Урана.

Предпринятая в 1820 г. Буваром попытка представить движение Урана при помощи найденных Лапласом возмущений сразу натолкнулась на неожиданные трудности. Оказалось, что всякая система элементов, удовлетворительно представляющая наблюдения Урана, сделанные после его открытия в 1781 г., неизбежно приводит к недопустимым невязкам при представлении тех 20 наблюдений, которые были получены в 1690—1769 гг. наблюдателями, принимавшими Уран за звезду.

Это привело Буvara к решению отбросить полностью старые наблюдения, «предоставив будущему выяснить, зависит ли трудность согласования от неточности старых наблюдений, или от наличия какого-то внешнего, неизвестного нам влияния на планету».

Однако очень скоро обнаружилось, что таблицы Буvara, основанные на наблюдениях 1781—1820 гг., не могут удовлетворительно представить не только более ранние наблюдения, но и более поздние. К 1840 г. ошибка в табличной долготе дошла до 1',5. Выяснившаяся таким образом невозможность представить движение Урана одними и теми же элементами для сколь угодно значительного промежутка времени была единодушно приписана действию более далекой, еще неизвестной планеты. Задача нахождения орбиты этой планеты по производимым ею возмущениям в движении Урана была не только совершенно новой, но и по существу дела достаточно трудной. Основная трудность заключалась в том, что наблюдения до 1781 г. были заведомо мало точны и их ошибки искажали те значения возмущений, которые являлись исходными данными задачи. С другой стороны, отбросить эти наблюдения было нельзя, так как прой-

*) Из этих таблиц могут быть отмечены таблицы, составленные Деламбром (J. Delambre, 1749—1822) для Солнца, Буваром (A. Bouvard, 1767—1843) — для Юпитера, Сатурна и Урана, Линденау (B. Lindenau, 1780—1854) — для Марса.

денная Ураном за 60 лет часть орбиты была слишком мала для успешного решения задачи.

Первое решение задачи дал Адамс (J. C. Adams, 1819—1892), взявшийся за нее в 1843 г. и сообщивший 21 октября 1845 г. директору Гринвичской обсерватории Эри (G. B. Airy, 1801—1892) элементы орбиты и положение на небе неизвестной планеты. Эри отнесся с недоверием к полученным результатам и не спешил начинать поиски.

Летом 1845 г. за ту же задачу взялся Леверрье (U. J. J. Le-verrier, 1811—1877). В трех статьях, доложенных Парижской Академии наук в ноябре 1845 г., в июне и августе 1846 г. и немедленно опубликованных, он пришел к выводам, очень близким к выводам Адамса. Чтение второй из этих статей настолько поколебало недоверие Эри, что он посоветовал директору Кембриджской обсерватории (обладавшей подходящим инструментом) приступить к поискам планеты в указанном Адамсом месте, как к делу более важному, чем все текущие работы. Такие поиски были начаты 29 июля и заключались, согласно разработанному Эри плану, в измерении координат всех звезд до 10—11 величины на площади около 300 квадратных градусов: это дало бы возможность узнать планету по ее смещению.

Но планета была открыта раньше, чем эти поиски были доведены до конца. Закончив свою третью статью, в которой было дано уточненное положение искомой планеты, Леверрье обратился к директорам ряда обсерваторий с просьбой организовать ее поиски. Аналогичную просьбу он включил несколько позднее в письмо, написанное совсем по другому поводу Галле (J. G. Gal-le, 1812—1910) — ассистенту Берлинской обсерватории, отметив, что планета должна иметь видимый диаметр, превосходящий 3", т. е. вполне заметный.

Получив это письмо, Галле решил сделать попытку, хотя директор обсерватории Энке (J. F. Encke, 1791—1865) и не советовал ему попусту терять время. В распоряжении Галле была только что изданная Берлинской Академией наук подробная карта соответствующей части неба, что существенно облегчало поиски.

В первый же вечер, 23 сентября 1846 г., он легко нашел новую планету, узнав ее по заметному диску. Просмотр поисковых наблюдений, сделанных в Кембридже, показал, что планета, названная вскоре Нептуном, наблюдалась там еще 4 и 12 августа; но эти наблюдения не были своевременно сопоставлены, а диск планеты не привлек внимания *).

*) Планета была найдена на расстоянии 52' от места, указанного Леверрье и 2°27' от места, вычисленного Адамсом. Однако такая точность была

Открытие Нептуна устранило причину наибольших невязок между гравитационной теорией движения планет и наблюдениями. Но к середине XIX в. выявилась недостаточная точность большинства планетных таблиц, дававших хотя и небольшие, но систематические расхождения с наблюдениями. Огромная работа по созданию новой более точной гравитационной теории движения планет была предпринята Леверрье *).

Полностью отказавшись от метода вычисления возмущений непосредственно в полярных координатах, который был применен Лапласом, Леверрье положил в основу метод вариации элементов, дающий возмущения элементов планетных орбит в функции времени. Другой особенностью его работы было систематическое использование наблюдательного материала для нахождения поправок не только элементов орбит планет, но и их масс.

Построенные Леверрье теории движения Меркурия, Венеры, Земли и Марса настолько хорошо согласуются с наблюдениями, что до сих пор служат для вычисления эфемерид этих планет, даваемых в *Connaissance des Temps*. Для достижения этого согласия ему пришлось, однако, теоретические значения вековых движений перигелиев Меркурия и Марса увеличить соответственно на $38''$ и $25''$, т. е. сделать эмпирические поправки в чисто гравитационных теориях движения этих планет. Аномалию в движении Меркурия Леверрье пытался объяснить притяжением интра-меркуриальной планеты. Но эта попытка оказалась неудачной: давно уже нет сомнения, что планета требуемых размеров не существует.

Значительно большие трудности представило изучение движений Юпитера и Сатурна как вследствие больших масс этих планет, так и по причине долгопериодических возмущений, вызываемых тем, что отношение периодов этих планет очень мало отличается от простой дроби $5/2$. В то время как для четырех внутренних планет почти всегда достаточен учет лишь возмущений первого порядка относительно масс, здесь пришлось вычислять много возмущений 2-го, 3-го и даже 4-го порядка. Несмотря на все усилия, Леверрье так и не удалось добиться удовлетворительного представления наблюдений Сатурна (расхождения в гелиоцентрической долготе доходили до $5''$ и даже до $9''$ — для

до известной степени случайна. Леверрье, публикуя свои результаты, считал, что он дает положение планеты с ошибкой, не превосходящей $18''$.

Подробное изложение методов, употребленных Адамсом и Леверрье, дают Тиссеран [1889] и Смарт [1953]. История открытия Нептуна весьма обстоятельно изложена в специальной работе Смарта [1947].

*) Созданные им теории движения планет и основанные на них таблицы были опубликованы в первых 14 томах (с 1855 по 1877 г.) *Annales de l'Observatoire de Paris (Mémoires)*.

наблюдений XVIII в.), а для Юпитера он получил удовлетворительное представление наблюдений за 1750—1863 гг. только ценой совершенно недопустимого уменьшения массы Сатурна.

Гайо (A. Gaillot), долголетний сотрудник Леверрье и продолжатель его работ, добился впоследствии гораздо более удовлетворительных результатов. Построенные им теми же методами теории движения Юпитера и Сатурна [Гайо, 1904 и 1913] дали довольно хорошее представление наблюдений за 1750—1890 гг. Невязки имеют, правда, систематический характер, но они невелики.

Другая теория движения Юпитера и Сатурна, основанная на методе Ганзена, была создана Хиллом [1890]. Его таблицы [1898] употреблялись для вычисления эфемерид этих планет в астрономических ежегодниках (кроме *Connaissance des Temps*, где применялись таблицы Гайо) до 1959 г. включительно *).

Вскоре после открытия Урана Леверрье приступил к построению теории его движения. Только через много лет эти работы были завершены Гайо [1910]. Гораздо раньше была опубликована теория движения Урана, созданная Ньюкомом [1873] при помощи видоизмененного им метода Лапласа, дающего возмущения полярных координат планеты без предварительного нахождения возмущений элементов. Таблицы, составленные Ньюкомом [1898] при помощи этой теории, вошли во всеобщее употребление, и все астрономические ежегодники (за исключением *Connaissance des Temps*) до 1959 г. включительно продолжали пользоваться таблицами Ньюкома, хотя эти таблицы базировались на меньшем наблюдательном материале, нежели таблицы Гайо.

После открытия Нептуна начались различного рода попытки найти еще более далекую, занептунную планету. Здесь можно отметить прежде всего попытки обосновать существование такой планеты, и даже указать ее положение, при помощи изучения расположения афелиев долгопериодических комет. Наиболее разработанная из таких попыток (Forbes, 1887) дала для среднего расстояния планеты 104,4 (тогда как для Плутона оно равно 39,5), а положение планеты отличалось от положения Плутона примерно на 80° .

К гораздо более надежным результатам могло привести изучение невязок между табличными и наблюдаемыми положениями Урана и Нептуна, начатое Гайо. Полагая, что наблюдения Нептуна, хотя и обнаружившие уже систематические невязки,

*) Сравнение положений Юпитера и Сатурна, даваемых таблицами Гайо и таблицами Хилла, показало, что для 1750—1950 гг. разности долгот и широт лишь в очень редких случаях превосходят $1''$, но никогда не достигают $2''$.

еще не могут дать хороших результатов, поскольку они охватывают лишь часть орбиты Нептуна, он сосредоточил свои усилия на изучении движения Урана, для которого наблюдения покрывали более двух периодов. Но и здесь задача была весьма трудной, поскольку возмущения Урана неизвестной планетой были несомненно раз в двадцать меньше тех, которыми оперировали Адамс и Леверрье, и едва превосходили ошибки наблюдений. Несмотря на это, Гайо удалось получить, усовершенствовав метод Леверрье, достаточно определенное решение задачи (1909). Решение получилось двойное: в зависимости от того, находилась ли неизвестная планета в эпоху наибольших невязок в соединении или в противостоянии с Ураном, для нее получались два положения на небе, отличающиеся приблизительно на 180° . Одно из найденных Гайо положений отличалось, как выяснилось впоследствии, от положения Плутона на 20° .

В 1915 г. Персиваль Лоуэлл (Percival Lowell, 1855—1916) опубликовал результаты своих многолетних работ. Его метод, являющийся дальнейшим развитием метода Леверрье, позволил вывести два решения, представляющие невязки в наблюдениях Урана лучше, чем решения Гайо. А учтя невязки в движении Нептуна, Лоуэлл смог сделать окончательный выбор между двумя решениями. Весьма важной заслугой Лоуэлла было обеспечение систематических поисков занептунной планеты. Созданная им в 1915 г. Флагстаффская обсерватория имела одной из своих главных задач такие поиски.

В течение долгого времени эти поиски велись при помощи недостаточно мощных инструментов. Но после установки (1929) Лоуренсом Лоуэллом нового большого телескопа, они очень скоро привели к цели. Планета была найдена [Томбо, 1960] при сравнении пластинок, полученных 23 и 29 января 1930 г. Она оказалась 15-й величины. Новая планета вскоре была названа Плутоном.

Открытие было подтверждено пластинкой, снятой 21 января 1930 г., вследствие чего эту дату считают иногда днем открытия планеты. Опубликовано открытие было 13 марта 1930 г. — в день, который является годовщиной открытия Урана и днем рождения Персиваля Лоуэлла.

Плутон оказался на расстоянии около 6° от места, соответствующего предсказанной Лоуэллом планете. Элементы Плутона — $a=39,6$, $e=0,246$, $\pi(1850,0)=221^\circ,3$ и $\epsilon(1850,0)=19^\circ,4$ оказались даже ближе к предсказанным Лоуэллом значениям $a=43,0$, $e=0,202$, $\pi=203^\circ,8$ и $\epsilon=22^\circ,1$, чем это имело место для Нептуна и предсказанной Леверрье планеты.

Задача о нахождении занептунной планеты из невязок, обнаружившихся в движении Нептуна, изучалась Тоддом (D. P. Todd) в 1877—1880 гг. Но с гораздо большим успехом это было сде-

лано Вильямом Пикерингом (W. H. Pickering, 1858—1938), который существенно улучшил графический метод, употребленный Тоддом, и применил его также и к невязкам Урана. В 1909, 1919 и 1928 гг. Пикеринг опубликовал три орбиты искомой планеты. Как выяснилось впоследствии, эти орбиты давали для эпохи 1930,0 долготу планеты, отличающуюся соответственно на $26^{\circ},6$, на $5^{\circ},9$ и на $26^{\circ},5$ от долготы Плутона. В декабре 1919 г. и январе 1920 г. по просьбе Пикеринга Маунт-Вилсоновской обсерваторией была получена серия поисковых пластинок, но планета найдена не была, хотя ее изображения на этих пластинках имелись. Она не была найдена потому, что на пластинках просматривалась лишь узкая зона в пределах 2° от эклиптики. Между тем Плутон находился в это время на расстоянии 4° от эклиптики *).

Открытие Плутона позволило по-новому подойти к задаче о построении гравитационной теории движения внешних планет. Не подлежит сомнению, что планеты, находящиеся за пределами орбиты Плутона, если таковые существуют, не могут оказать ощутимого влияния на движение пяти внешних планет, по крайней мере в течение тех немногих столетий, которые охватываются нашими наблюдениями. С другой стороны, влияние четырех внутренних планет на движение внешних планет весьма мало и поэтому легко поддается совершенно точному учету. Таким образом, представление наблюдений гравитационной теорией пяти внешних планет можно с полным основанием рассматривать как проверку закона Ньютона. Но, конечно, гравитационная теория должна быть для этого совершенно строгой, т. е. давать точное, в пределах принятого числа знаков, решение дифференциальных уравнений движения.

Получение такого решения стало возможным благодаря огромному прогрессу вычислительной техники, которым ознаменовалась первая половина XX в. Электронные вычислительные машины позволили Эккерту, Брауэру и Клеменсу дать совершенно точную гравитационную теорию движения пяти внешних планет для отрезка времени, охватывающего все достаточно точные наблюдения [1951].

Ими было произведено численное интегрирование системы дифференциальных уравнений, определяющих движение Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона под действием притяжения Солнца и их взаимных притяжений, т. е. системы 30-го порядка. Это интегрирование было выполнено с 14 знаками на интервале времени от 1653 по 2060 год. Значения постоянных интегрирования были исправлены при помощи 25 000 наблюдений, полученных с 1780 по 1940 год.

*) Подробный анализ методов, употребленных Лоуэллом и Пикерингом, а также полученных ими результатов, содержит мемуар Курганова [1940].

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-