

## ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

## ГЛАВА I

## ОТКРЫТИЕ ЗАКОНА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

## § 1. Теория эксцентриков и эпициклов

Раздел астрономических наук, который начиная с XVII в. стал называться теоретической астрономией, имеет своим основным предметом изучение движений тел солнечной системы.

Это изучение началось с открытия различного рода периодичностей в их видимых движениях. Такие чисто эмпирические закономерности были найдены еще в глубокой древности. За 5—6 веков до начала нашей эры вавилоняне уже знали с большой точностью не только продолжительность года и месяца, но и периоды обращений пяти планет. Для получения таких результатов нужны были столетия систематических наблюдений.

Дальнейшее развитие астрономических знаний стало возможным лишь после того как греческие ученые создали геометрию. Первые теоретические представления, оставившие прочный след в науке, мы встречаем у натурфилософов пифагорейской школы. Ими была установлена шарообразность Земли и было показано, что движение Солнца подобно движению Луны может быть получено сложением двух равномерных круговых движений: вокруг оси экватора с суточным периодом и вокруг оси эклиптики с годовым периодом. Этот успех естественно привел к попыткам объяснить подобным же образом и движения пяти планет.

Первая систематическая попытка представить движения небесных тел сочетаниями вращений концентрических сфер, общий центр которых совпадает с центром Земли, связана с именами Эвдокса Книдского (409—356 гг. до н. э.) и Калиппа (370—300 гг. до н. э.). Согласно этим представлениям «сфера неподвижных звезд», заключающая внутри себя все остальные и вращавшаяся с суточным периодом вокруг оси экватора, сообщала это вращение всем другим сферам, воспроизводившим индивидуальные особенности движений Солнца, Луны и планет.

Индивидуальные движения Солнца и Луны принимались происходящими по большому кругу геоцентрической сферы, так что

для их воспроизведения достаточно было ввести только по одной сфере для каждого светила. Гораздо сложнее дело обстояло с планетами, основные закономерности в движениях которых были подмечены еще в глубокой древности. Было известно, что каждая планета, несмотря на всю причудливость своего движения, в среднем движется поступательно по большому кругу; что ее угловая скорость вдоль этого круга хотя и меняет свою величину (а временами даже знак), в среднем остается постоянной. Дальнейшее изучение движения того или иного светила приводилось поэтому к изучению его «неравенств» или «уравнений», т. е. отклонений от равномерного движения по большому кругу. Таким образом различались неравенства долготы (в орбите), менявшие скорость движения, и неравенства широты, отклонявшие планету от движения по большому кругу.

По мере того как движение планет становилось известным лучше, количество геоцентрических сфер, потребных для представления этого движения, приходилось увеличивать. Наибольшее свое развитие эта концепция получила у Аристотеля (384—322 гг. до н. э.), который довел общее число сфер до 56. Но и при таком усложнении нельзя было достичь удовлетворительного представления даже весьма грубых наблюдений того времени. Однако преклонение перед всеобъемлющей энциклопедией человеческих знаний, созданной Аристотелем, было столь велико, что его «система мира» преподавалась в университетах до конца XV в. Основные причины того, что эта столь несовершенная, чисто качественная теория так долго пользовалась всеобщим признанием, заключались в отсутствии связи схоластической науки средневековья с практическими приложениями и в том, что хрустальные сферы Аристотеля давали вполне законченную, так сказать, физическую картину мира. Между тем несравненно более совершенные с практической точки зрения теории Птолемея, позволявшие предвычислять положения светил, вскрывали лишь законы видимых движений, но, в сущности, не претендовали на «объяснение» устройства мира. Только в эпоху Возрождения, когда бурно развивавшееся мореплавание выдвинуло на первый план практические приложения астрономии, учение Аристотеля было окончательно оставлено.

Первоначальная форма математических теорий, позволивших астрономам древности удовлетворительно воспроизвести общий характер движения светил, связана с именами Аристарха Самосского (начало III в. до н. э.), у которого мы встречаем первые попытки делать астрономические измерения, и Аполлония Пергского (середина III в. до н. э.), одного из величайших греческих математиков. Такой первоначальной формой была теория «подвижных эксцентриков», согласно которой каждая планета двигалась равномерно по эксцентрическому кругу, т. е. по

кругу, центр которого не совпадал с центром Земли. Центр каждой планетной орбиты считали находящимся на прямой, соединяющей центр Земли с центром Солнца, так что центры планетных орбит обращались вокруг Земли вместе с Солнцем. Солнце и Луна двигались, согласно тогдашним представлениям, по окружностям, центры которых совпадали с центром Земли. Радиусы планетных орбит предполагались такими, что Земля находилась вне орбит Меркурия и Венеры, тогда как орбиты внешних планет, т. е. Марса, Юпитера и Сатурна, заключали внутри себя как Землю, так и орбиту Солнца.

Первые действительно научные теории, представляющие движения светил не только качественно, но и количественно, мы находим у Гиппарха (II в. до н. э.). Для объяснения открытой им неравномерности движения Солнца по эклиптике, выражающейся прежде всего в неравенстве времен года, Гиппарх предположил, что Солнце движется равномерно по неподвижному эксцентрику. Он показал, что это дает возможность, сохранив принцип равномерного кругового движения, удовлетворительно воспроизвести наблюдаемое движение Солнца. Действительно, при надлежащей величине эксцентриситета (так было названо отношение расстояния между центром Земли и центром орбиты Солнца к радиусу этой орбиты) движение, рассматривавшееся Гиппархом, хорошо воспроизводило найденную им неравномерность в изменении долготы Солнца\*). Аналогичную теорию Гиппарх построил для Луны. Но здесь ему пришлось придать эксцентрику, по которому движется Луна, еще два вращательных движения: одно — с периодом в  $18\frac{1}{2}$  лет — для представления попятного движения линии узлов, другое — с периодом около 9 лет — для учета поступательного движения перигея лунной орбиты.

Гиппарх показал, что открытое им так называемое первое неравенство в движениях Солнца и Луны, заключающееся в периодическом изменении скорости видимого движения, с периодом, равным времени обращения светила, может быть воспроизведено и другим путем. Он использовал для этого известную еще Аполлонию эквивалентность движения по эксцентрику движению по надлежаще выбранному эпициклу. Так, например, движение Солнца совершенно одинаково представляется каждой из двух следующих гипотез.

---

\*) Равномерное движение по эксцентрику с большою точностью воспроизводит кеплерово движение по эллипсу с небольшим эксцентриситетом, если эксцентриситет эксцентрика взять равным удвоенному эксцентриситету эллипса.

Эксцентриситет круговой солнечной орбиты Гиппарх нашел равным  $\frac{1}{24}$ , тогда как эксцентриситет эллиптической орбиты Земли в действительности равняется  $0,01675 = 1/59,7$ .

1. Солнце  $S$  (рис. 1) движется равномерно с запада на восток по окружности  $SA$ , центр которой  $C$  не совпадает с центром Земли  $T$ , делая полный оборот в один тропический год.

2. Солнце  $S$  равномерно обращается с востока на запад с периодом в один тропический год, по эпициклу, радиус которого  $S_0S$  равен  $TC$ . Центр эпицикла  $S_0$  равномерно обращается с тем же периодом, но в противоположном направлении, с запада на восток, по геоцентрической окружности, радиус которой  $TS_0$  равен радиусу  $CS = CA$  эпицикла.

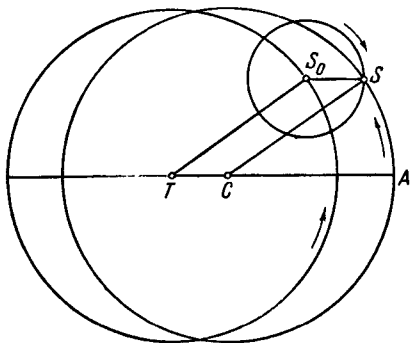


Рис. 1.

ним солнцем, а угол  $ATS_0$  — средней аномалией Солнца \*).

Аналогично этому, теорию движения Луны Гиппарх дал также в двух различных формах — при помощи эксцентрика и при помощи эпицикла, как бы подчеркивая этим, что он видит свою задачу только в математическом представлении видимых движений.

Теорию движения планет Гиппарх не разрабатывал, так как считал недостаточными имевшиеся в его распоряжении наблюдения. Он ограничился собиранием наблюдений и доказательством с их помощью неудовлетворительности теорий современных ему астрономов.

Дальнейшим и притом весьма существенным прогрессом в деле развития теоретической астрономии мы обязаны Клавдию Птолемею (прибл. 70—140 гг. н. э.). В его знаменитом трактате «Великое математическое построение астрономии в XIII книгах», известном под сокращенным арабизированным названием «Альмагест» (от греческого «Мегистэ Синтаксис» — «Величайшее Построение»), впервые были установлены законы видимых движений планет и стало возможным предвычислять их положения. Таким образом, в «Альмагесте» решалась задача, которую

\* Полезно отметить, что обычай отсчитывать углы от перигелия окончательно установился только в начале XIX в. Раньше углы отсчитывались от апоцентра.

в древности многие (например, Платон) считали непосильной для человеческого разума. Это имело, конечно, первостепенное идеологическое значение, но не менее важно было то практическое значение, которое имело открытие законов видимого движения светил для нужд кораблевождения и составления географических карт. Именно практическая ценность таблиц движения светил, содержащихся в «Альмагесте», создала тот огромный авторитет, которым пользовалось это сочинение сначала на Востоке, а потом и в Западной Европе.

Теорию движения Солнца, созданную Гиппархом, Птолемей воспроизвел в «Альмагесте» без всяких изменений, но теорию движения Луны он существенно дополнил, открыв новое неравенство в долготе Луны, названное впоследствии эвекцией. Учет и этого второго неравенства (для чего геоцентрический деферент Гиппарха был заменен деферентом-эксцентриком) позволил Птолемею настолько точно представить наблюдаемые долготы Луны вблизи сизигий и квадратур, что впервые стало возможным удовлетворительное предсказание затмений \*).

Исключительно большой заслугой Птолемея является создание первой настоящей теории движения планет, притом настолько совершенной, что в течение 13 веков никто не сумел заменить ее лучшей. По праву гордясь результатами своей огромной работы, Птолемей начинает вторую половину «Альмагеста», посвященную планетам, словами: «Теперь нашей целью является показать, что и для пяти блуждающих звезд, совершенно так же как для Солнца и Луны, кажущиеся аномалии движения могут быть воспроизведены сочетанием равномерных круговых движений; именно такие движения приличествуют небесным телам, тогда как беспорядок и многообразие чужды им; вот почему решение этой задачи может быть рассматриваемо как великое достижение, более того, — как конечная цель философски понимаемых математических наук; но по многим причинам эта

---

\* Амплитуду эвекции Птолемей нашел равной  $1^{\circ}19'30''$ , что мало отличается от истинной величины, близкой к  $1^{\circ}16'48''$ .

Невозможность хорошо представить долготы Луны в орбите подвижным эксцентриком (учитывающим первое неравенство — уравнение центра, зависящее, как мы теперь знаем, от эллиптичности орбиты) была ясна еще Гиппарху. Но только Птолемею удалось выделить из остающихся невязок второе неравенство. Птолемей знал, что двумя неравенствами наблюдения Луны не могут быть представлены вполне удовлетворительно, но он не сумел открыть третье большое неравенство долготы Луны — вариацию. Несмотря на большую амплитуду (около  $39^{\circ}30''$ ), вариация была открыта лишь в 1598 г. Тихо Браге. Так как вариация не изменяет долготу Луны в сизигиях и квадратурах, то понятно, почему неучет ее не отражался на точности предвычисления затмений по таблицам Альмагеста.

задача трудна и потому естественно, что до сих пор никто не имел успеха в ее решении».

Следуя теории, разработанной им для Луны, Птолемей разложил видимое движение каждой планеты (относительно неподвижных звезд) на два движения: по деференту-эксцентрику и по эпициклу. Но для того, чтобы воспроизвести как первое неравенство в движении планет (изменение величины скорости), так и второе (изменение направления движения — стояния и попятные движения), это разложение было выполнено иначе, нежели для Луны. Рассмотрим движение внешней планеты  $P$  относительно Земли  $T$  (рис. 2). Пусть в точке  $S_0$  находится среднее солнце, обращающееся по геоцентрической окружности. Окружность с центром в  $C$  представляет деферент, по которому движется средняя планета  $P_0$ , являющаяся центром эпицикла. Движение происходит так, что радиус эпицикла  $P_0P$  все время параллелен прямой  $TS_0$ ; таким образом, движение по эпициклу и по деференту совершается здесь в одном и том же направлении.

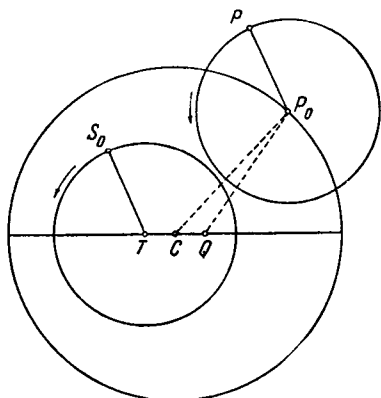


Рис. 2.

В изложенную теорию, являющуюся прямым развитием концепций Аполлония, Птолемей внес новую, весьма плодотворную идею. Чтобы лучше представить первое неравенство (уравнение центра),

он отказался от равномерности движения центра эпицикла  $P_0$  по деференту: у него точка  $P_0$  движется так, что вращается с постоянной угловой скоростью не прямая  $CP_0$ , а прямая  $QP_0$ , где точка  $Q$  определяется условием  $CQ = CT$ . Сравнение с эллиптическим движением показывает, что эта «гипотеза биссекции» (точка  $C$  делит отрезок  $TQ$  пополам) уменьшает ошибку в уравнении центра в три раза.

Точка  $Q$ , из которой угловое движение средней планеты представляется равномерным, служила у Птолемея центром «круга равномерного движения», получившего впоследствии название экванта. Эквантом называлась также и сама точка  $Q$  (punctum aequans — точка выравнивания).

Теория движения внутренних планет — Меркурия и Венеры — отличалась тем, что долгота средней планеты  $P_0$  была все время равна долготе среднего солнца  $S_0$ , т. е. прямые  $QP_0$  и  $TS_0$  были параллельны. Таким образом, период обращения по деференту

здесь был равен году, а период обращения по эпициклу — сидерическому обороту планеты \*).

Придав плоскостям деферента и эпицикла надлежащие наклоны, Птолемей сумел до известной степени представить и движение планет по широте, т. е. второе неравенство.

Насколько хорошо теории «Альмагеста» воспроизводили относительные размеры, форму и положение планетных орбит (с точки зрения возможности представления долгот), видно из таблицы 1. Через  $a$ ,  $e$  обозначены большие полуоси и эксцентриситеты эллиптических планетных орбит; через  $\alpha$  обозначено найденное Птолемеем отношение радиуса эпицикла к радиусу деферента, а через  $\varepsilon$  — найденное им значение эксцентриситета (кругового).

Т а б л и ц а 1

Планета	$a$	$1/a$	$\alpha$	$e$	$\frac{1}{2}e$
Меркурий . . . . .	0,3871	—	0,3708	0,206	0,050
Венера . . . . .	0,7233	—	0,7194	0,007	0,011
Марс . . . . .	1,5237	0,6563	0,6583	0,093	0,100
Юпитер . . . . .	5,2028	0,1922	0,1917	0,048	0,046
Сатурн . . . . .	9,5388	0,1048	0,1083	0,056	0,057

Таким образом, цель, которую себе ставил Птолемей — дать возможность предвычислять видимые долготы и широты планет, была достигнута. Но он не мог не знать, что его теория движения Луны неизбежно приводит к таким колебаниям в ее геоцентрических расстояниях, что наибольший видимый диаметр Луны должен был бы быть вдвое больше наименьшего, что совершенно противоречит наблюдениям. Это дало основание думать, что Птолемей рассматривал развитые им теории не как «систему мира», представляющую реальные движения небесных тел, а лишь как средство предвычислять их видимые положения \*\*)

\*) Для Меркурия, представление движения которого было сопряжено с особыми трудностями (вследствие большого эксцентриситета его орбиты), Птолемей поместил центр экванта между Землей и центром деферента.

Конструкция, аналогичная экванту, была Птолемеем введена и в теорию движения Луны для учета эвекции.

\*\*) В «Альмагесте» Птолемей действительно стоит на чисто научных позициях и не только предупреждает против излишних гипотез, но и действительно избегает их. Однако подобно тому как Лаплас, закончив строго научный трактат «Небесная механика», написал «Изложение системы мира», в котором он развивает свои философские взгляды и дает волю воображению, так и Птолемей после «Альмагеста» написал еще «Гипотезы о блуждающих светилах». Во введении к этой книге он говорит: «Я не претендую представить этим путем все движения одновременно; но я покажу, что каждое из