

§ 2. Гелиоцентрическая теория планетных движений *)

От создания «Альмагеста» до появления в 1543 г. трактата «Об обращении небесных тел, VI книга» (*De revolutionibus orbium coelestium, Libri VI*), обессмертившего имя Николая Коперника (1473—1543), прошло 14 веков. За это время было сделано несколько попыток улучшить теории Птолемея в различных деталях, но эти попытки носили чисто технический характер и не имели большого значения. Действительно полезным для науки результатом работы средневековых астрономов было, с одной стороны, существенное развитие тригонометрии (замена хорд синусами, введение тангенсов, улучшение способов решения сферических треугольников); с другой, — составление новых таблиц движения светил, хотя и основанных на тех же теориях, что и таблицы «Альмагеста», но опирающихся на более точные и более многочисленные наблюдения.

Заслуженной известностью пользовались: «Хакемитовы таблицы», составленные Ибн-Юнусом (950—1009) на обсерватории, построенной для него Аль-Хакимом в Каире; «Толедские таблицы», составленные Аль-Заркали (1029—1087); «Ильхановы таблицы», созданные Мухаммедом Насирэдином Туси (1201—1274) и учеными руководимой им обсерватории в Мераге; таблицы Улугбека (1394—1449), явившиеся результатом работ созданной им в Самарканде обсерватории. Особенно большое распространение имели «Альфонсовы таблицы», созданные в 1240—1252 гг. группой арабских и еврейских астрономов, собранных для этой цели Кастильским королем Альфонсом X; в течение трех столетий они считались наилучшими.

Огромное значение трактата Коперника, сделавшее его появление переломным моментом в истории естествознания, было обусловлено тем, что этот труд был первым решительным шагом в деле преобразования астрономии из науки чисто геометрической в науку физическую. Птолемей изучал движение каждого светила в отдельности как чисто геометрическую проблему. Этим объясняется то странное теперь для нас обстоятельство, что подмеченная им зависимость движения каждой планеты от движения Солнца не привела его ни к объединению теорий отдельных

них может быть объяснено в отдельности при помощи соответствующей гипотезы». После такого заявления, вполне гармонирующего с духом «Альмагеста», Птолемей в дальнейшем занимается построением комбинаций сферических тел, которые воспроизводили бы видимые движения светил, причем эти комбинации вращающихся сфер он выводит, следуя «Физике» Аристотеля, из свойств субстанции, образующей небо, т. е. рассматривает их как представляющие истинную природу вещей, а не как математические модели.

*) Некоторые вопросы истории создания теорий движения планет изложены в книгах Фришауфа [1922] и Штумпфа [1959].

светил в одно целое, ни к выяснению до конца роли Солнца. Более того, в теориях Птолемея движением планет управляет, как мы видели в предыдущем параграфе, не реальное Солнце, а фиктивная точка — среднее солнце.

Коперник первый отчетливо понял, что не было смысла углублять дальше математическую теорию движения каждой планеты в отдельности (как это делали все последователи Птолемея), если еще не объяснены и не использованы связи, существующие между видимыми движениями планет и Солнца и подчеркивающие особую роль Солнца. «Допустим, — говорит он, — что Венера и Меркурий обращаются вокруг Солнца, тогда их элонгации вполне определятся радиусами их орбит. Кто нам мешает отнести к тому же центру движения Сатурна, Юпитера и Марса? Для этого нужно только задать надлежащим образом радиусы их орбит». Эти слова показывают, что Коперник пришел сначала к «системе мира», в которой пять планет обращались вокруг Солнца, которое в свою очередь обращалось вокруг Земли. Огромный прогресс был здесь не только в том, что «мир» впервые был связан в одно органическое целое, что непонятные раньше эмпирические зависимости получали весьма простое объяснение, но и в большей точности представления видимых движений, что было обусловлено прежде всего отнесением движения планет к положению реального Солнца.

Таков был первый этап в деле создания гелиоцентрической теории планетных движений. Второй этап заключался в том, что Коперник низвел Землю на положение одной из планет. Если первый этап потребовал от Коперника большого математического искусства и немалой наблюдательной работы, то второй этап был связан с преодолением весьма серьезных трудностей со стороны физики, находившейся в эмбриональном состоянии и неотделившейся еще от схоластической философии. Копернику пришлось здесь, оставаясь формально на позициях схоластической философии, проводить новую, чрезвычайно важную идею, в корне подрывавшую сущность этой философии — идею о единстве мира, о том, что «небо» и «земля» подчиняются одним и тем же законам. В то время как Птолемей, следуя Аристотелю, доказывал невозможность вращения Земли тем, что такое вращение разорвало бы Землю на части, Коперник указывает, что при допущении неподвижности Земли «небу» пришлось бы двигаться с неизмеримо большими скоростями и опасность разрушения была бы несравненно больше. Этим аргументом аристотелевское «небо» сразу лишалось вечности и неизменности — ему приписывались свойства, характерные для всего «земного».

Приняв вращение Земли около оси, Коперник уже легко мог допустить и ее обращение вокруг Солнца. Он прекрасно понимал полную кинематическую эквивалентность своей

первоначальной системы (тождественной с той, которую в 1587 г. предложил Тихо Браге для спасения тезиса о совпадении «центра мира» с центром Земли) с «гелиоцентрической системой мира». Перенос «центра мира» в центр Солнца Коперник мотивирует соображениями в духе схоластической философии: «В середине всех этих орбит находится Солнце; ибо может ли прекрасный этот светоч быть помещен в столь великолепной храмине в другом, лучшем месте, откуда он мог бы все освещать собой?» Целесообразность и даже необходимость такого переноса вытекала, если не для самого Коперника, то во всяком случае для его ближайших продолжателей, из законов динамики, еще не сформулированных, но уже более или менее ясно ощущавшихся благодаря успехам техники.

Идеи вращения Земли и ее обращения вокруг Солнца не были новыми *), но лишь Коперник, связавший их с математическими теориями Птолемея и уже носившимися в воздухе идеями новой механики, сделал их убедительными и плодотворными для науки.

Все возможности, заключавшиеся в гелиоцентрической **) теории планетных движений как рабочей гипотезе, были с исключительной мощью вскрыты Иоганном Кеплером (1571—1630). Его основное сочинение «Новая астрономия или Небесная физика, содержащая исследования движения Марса по наблюдениям Тихо Браге» (*Astronomia nova seu Physica Coelestis, tradita commentariis de motibus stellae Martis. Ex observationibus G. V. Tychonis Brahe. 1609*), законченное в 1607 г., имело для

*) Современник Аристотеля Гераклит Понтский полагал, что «можно описать видимые явления, если предположить Небо неподвижным, а Землю, находящуюся в центре Мира, вращающейся». Не менее интересным было предложенное им объяснение движений Меркурия и Венеры обращением этих планет вокруг Солнца. В совершенно законченном виде мы находим гелиоцентрическую систему у Аристарха Самосского (примерно через 50 лет после смерти Аристотеля), который выдвинул ее в качестве возможной гипотезы. Его взгляды, по свидетельству древних авторов, были широко известны.

Все это хорошо знал Птолемей. В «Альмагесте» указывается на возможность объяснить суточное движение светил как вращением Земли, так и вращением всего «мира», и подчеркивается геометрическая эквивалентность этих гипотез. Но, как отмечает Птолемей, большинство ученых считает вращение Земли физически невозможным. Столь же мало возможным, с точки зрения античной механики, изложенной в «Физике» Аристотеля, было обращение Земли вокруг Солнца.

Птолемей подчеркивает, что основной целью «Альмагеста» является решение практических задач и что уже по одному этому следует исходить из предположения о неподвижности Земли, так как «все, что трудно понимаемо, представляется широким кругам непригодным для практического применения».

**) Развитая Коперником «система мира» не была «гелиоцентрической» в буквальном смысле слова, так как центры деферентов-эксцентриков, по которым в ней двигались эпициклы планет, не совпадали с Солнцем.

развития науки не меньшее значение, чем трактат Коперника. Одинаково важны были и полученные в этом сочинении законы движения планет и использованный Кеплером метод, знаменовавший начало новой науки, целиком основанной на наблюдении и эксперименте. Коперник, так же как и Птолемей, у которого «Альмагест» начинается с аксиом, клал в основу своих теорий априорное утверждение: «Движение небесных тел есть движение равномерное, круговое, непрерывное или слагающееся из круговых движений»; это утверждение он обосновывает лишь «совершенством» небесных тел *). Напротив, Кеплер ставит себе целью построить «астрономию без гипотез». Комбинируя видимые положения планеты в надлежаще выбранные моменты и сопоставляя их с одновременными положениями Солнца, он получает пространственные гелиоцентрические координаты планеты; не связывая себя никакими предвзятыми принципами, он ищет затем зависимости между этими координатами и временем.

Таким путем он делает первое свое открытие: движение каждой планеты происходит в плоскости, проходящей через центр Солнца. Уже этот результат позволил представить широты планет несравненно лучше, чем это имело место в теориях Птолемея и Коперника, в которых планеты двигались по кривым двойной кривизны. Далее Кеплером был получен закон площадей и, наконец, после ряда проб им было установлено, что траектория планеты лучше всего представляется эллипсом, фокус которого совпадает с центром Солнца.

Эти открытия позволили Кеплеру представить движение каждой планеты с гораздо большей точностью, чем это могли сделать все его предшественники. В 1619 г. он дополнил их еще одним открытием первостепенной важности: его многолетние усилия найти связь между элементами различных планет увенчались наконец успехом.

Все эти результаты составляют три закона Кеплера, формулируемые обычно следующим образом:

I. Каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

II. Площадь сектора, описываемого радиусом-вектором планеты, изменяется пропорционально времени.

*) В отношении соблюдения принципа равномерных круговых движений, как единственно возможных для небесных тел, Коперник был еще более строг, нежели Птолемей. В своей теории эквантов Птолемей молчаливо отошел от этого принципа, допустив неравномерное движение по кругу. Это было плодотворной идеей, открывшей впоследствии дорогу Кеплеру к установлению истинных законов планетных движений. Коперник ставил себе в заслугу полный отказ от эквантов: он их заменил дополнительными эпичклами.

III. Квадраты периодов обращений планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.

Уже Кеплеру было известно, что эти законы, завершившие создание эмпирической кинематики солнечной системы, не абсолютно строги. Хотя для планет они выполняются с большой точностью (особенно два первых), но чтобы представить сколько-нибудь удовлетворительно движение Луны, нужно было еще сделать эллиптическую орбиту подвижной и добавить эвекцию и вариацию. Причины всех этих отклонений стали ясны после открытия закона всемирного тяготения.

Вскоре после появления гелиоцентрической теории Эразм Рейнгольд составил основанные на ней новые таблицы движения светил, более точные и более подробные, нежели таблицы самого Коперника. Эти таблицы, названные им «Прусскими таблицами» (*Tabulae Prutenicae*, 1551), быстро вытеснили «Альфонсовы таблицы», имевшие еще широкое распространение.

Открыв свои первые два закона, Кеплер приступил к составлению основанных на них таблиц. Они были опубликованы в 1627 г. под названием «Рудольфовых таблиц» (*Tabulae Rudolphinae*) и по своей точности далеко превзошли все прежние таблицы.

§ 3. Движение по законам Кеплера

Покажем, как координаты планеты, движущейся вокруг Солнца по законам Кеплера, могут быть выражены в функции времени.

Центр S эллипса, описываемого планетой M (рис. 3) примем за начало координат; за ось Sx примем направление большой полуоси $SP = a$, проходящей через фокус S , в котором находится Солнце; за ось Sy примем направление малой полуоси $SB = b$.

Уравнение эллипса в этой системе координат

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3.1)$$

заменяем параметрическими уравнениями, выбрав параметр следующим образом. Из точки $M(x, y)$, изображающей положение планеты, опустим перпендикуляр MN на ось абсцисс. Продолжение этого перпендикуляра до пересечения с окружностью, описанной на большой оси эллипса AP как на диаметре, дает точку M' . Задание каждой из точек M и M' однозначно определяет другую. Но положение точки M' можно определить углом E , отсчитываемым от большой полуоси SP до радиуса SM' в направлении движения планеты. Этот угол называется эксцентрической аномалией.