

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

531.352 (09)

ИОГАНН КЕПЛЕР: ОТ «МИСТЕРИИ» ДО «ГАРМОНИИ»

Ю. А. Данилов, Я. А. Смородинский

Though this be madness, yet there is method in't *)

(«Hamlet», act II, sc. ii)

Ἄναρμονικὸς μὴ κρινέτω **)

(надпись на экземпляре «Гармонии мира», принадлежавшем биографу Кеплера Максу Каспару)

На одной из страниц книжного каталога, который был издан к весенней Франкфуртской ярмарке 1597 г. (в крупнейшем центре торговли книгами в то время), появилось новое странно звучащее имя Repleus. Под невольным псевдонимом, обязанным лишь небрежности наборщика, скрывалось совсем другое, также мало кому известное имя Иоганна Кеплера.

Маленькая книжка, отпечатанная незадолго до ярмарки (в конце 1596 г.), носила вычурное название «Предвестник космографических исследований, содержащий тайну мироздания относительно чудесных пропорций между небесными кругами и истинных причин числа и размеров небесных сфер, а также периодических движений, изложенный с помощью пяти правильных тел Иоганном Кеплером из Вюртемберга, математиком достославной провинции Штирии» ***).

Если не считать календарей, составление которых входило в обязанности математика провинции, «Предвестник», или, как предпочитал называть его сам Кеплер, «Misterium Cosmographicum» («Тайна мироздания»), был первым сочинением Кеплера на астрономические темы и единственным из его трудов, выдержавшим два прижизненных издания. Уступая настояниям друзей, Кеплер на склоне лет предпринял второе издание «для пользы не только книготорговцев, но и ученых». Обращаясь к новому читателю, Кеплер уже в конце своего жизненного пути (оставались еще ненаписанными только «Рудольфовы таблицы») с гордостью писал в посвящении:

«Прошло почти 25 лет с тех пор, как я выпустил в свет небольшую книжку «Тайна мироздания». И хотя в то время я был еще очень молод и эта публикация была моей первой астрономической работой, все же успех, сопутствовавший ей в последующие

*) Пусть это безумие, но в нем есть система.—«Гамлет», акт. 2, сц. 2. («Гамлет» издан в год встречи Кеплера с Тихо Браге.)

**) В ком нет музыки, да молчит.

***) Все переводы с латыни отрывков из сочинений Кеплера и пояснения к переводам [в квадратных скобках] сделаны авторами статьи.

годы, красноречиво свидетельствует о том, что никогда и никому еще не удавалось сочинить более значительной, удачной и ценной для трактуемого предмета первой работы... Словно оракул с небес продиктовал мне главы этой книжки, так все они, по общему признанию, были превосходны и отвечали истине... Мне самому, в течение вот уже 25 лет работающему над преобразованием астрономии (начатым знаменитым и благородным датским астрономом Тихо Браге), главы этой книжки не раз освещали путь. Почти все астрономические труды, которые я опубликовал за это время, берут свое начало в той или иной главе моей первой работы и поэтому могут рассматриваться как более подробное или более полное изложение этих глав. Причина этого — не в том, будто я поступал так из любви к своим открытиям..., а в том, что сама природа вещей, подкрепленная чрезвычайно точными наблюдениями Тихо Браге, привела меня к выводу, что нет иного пути к преобразованию астрономии, надежности вычислений и к построению метафизической части астрономии, называемой также физикой небес, кроме того пути, который я в этой книжке либо подробно описал, либо (если у меня не было еще глубокой уверенности) робко наметил. В подтверждение сошлюсь на «Новую астрономию», вышедшую в 1619 г., а также на «Комментарий к движениям других планет», который я еще не издал, на 5 книг «Гармонии мира», напечатанных в 1619 г., и на четвертую книгу «Очерков коперниканской астрономии», вышедшую в 1620 г. В качестве свидетелей я назову всех читателей, которые в течение вот уже многих лет, с тех пор, как была опубликована «Тайна мироздания», настойчиво требуют от меня давно уже пришедших в негодность экземпляров этой книги, чтобы своими глазами увидеть, каким образом удалось вывести так много важных заключений».

Поставленную перед собой цель Кеплер отчетливо сформулировал в предисловии к читателю, которым открывается «Тайна мироздания»:

«Любезный читатель! В этой книжке я вознамерился доказать, что всеблагий и всемогущий бог при сотворении нашего движущегося мира и при расположении небесных орбит избрал за основу пять правильных тел, которые со времен Пифагора и Платона и до наших дней снискали столь громкую славу, выбрал число и пропорции небесных орбит, а также отношения между движениями выбрал в соответствии с природой правильных тел...

Сущность трех вещей — почему они устроены так, а не иначе — особенно интересовали меня, а именно: число, размеры и движения небесных орбит».

Так, в предисловии к первой же книге Кеплера был задан вопрос, являющийся основным вопросом физики нового времени, — вопрос о причинах явлений природы. Столь естественный в наши дни, этот вопрос во времена Кеплера прозвучал необычно. Ни в птолемеевской, ни даже в коперниканской астрономии он не подымался. Следуя многовековой традиции, астрономы видели задачу своей науки лишь в возможно точном описании и предсказании небесных явлений. В отъезде на работу Кеплера, представленном ректору Тюбингенского университета Хафенрефферу учителем Кеплера Местлином, говорилось: «...Предмет и метод [этого труда] новы и не приходили до сих пор никому в голову... Кто бы мог даже задуматься о... числе, размерах и движении сфер, обосновать все это и извлечь из тайных предначертаний бога-творца? Однако Кеплер осмелился на подобное предприятие и успешно довел его до конца».

Как же ответил Кеплер на свои удивительные вопросы? Как ему удалось найти эти ответы? История поисков подробно изложена в том же предисловии к читателю.

Сначала Кеплер предположил, что радиусы небесных сфер отличаются в 2, 3, 4 и т. д. раза, но проверка убедила его в ошибочности этой гипотезы. Отвергнув ее, он «попытался испробовать удивительно смелый выход». Между Юпитером и Марсом, а также между Венерой и Меркурием он поместил «две новые планеты, невидимые вследствие их малых размеров, и приписал им определенные периоды обращения... Однако для того, чтобы заполнить чудовищный разрыв между Юпитером и Марсом одной новой планеты оказалось недостаточно». Вторая попытка также не привела к желаемому результату, и Кеплер предпринимает третью попытку.

От двух предыдущих она отличается большей изощренностью в выборе математических средств: расстояние между Солнцем и планетой Кеплер пытается представить с помощью одной тригонометрической функции, а «движущую силу планеты» (понятие, к которому сводится скорость планеты) — с помощью другой тригонометрической функции.

О последующих попытках Кеплер рассказывает так: «На эту тяжелую работу я потратил почти все лето. Наконец, чисто случайно мне удалось приблизиться к истине... 9 июля 1595 г. я вознамерился показать моим слушателям, как великое соединение [Юпитера и Сатурна] всегда перепрыгивает через восемь знаков [зодиака] и от одного тригона переходит к другому. Для этого я нарисовал в круге множество треугольников (если только их можно так назвать) в такой последовательности, чтобы они переходили друг в друга. Точки пересечения сторон треугольников образовали меньшую окружность, ибо радиус окружности, вписанной в такой треугольник, равен половине радиуса описанной окружности. Отношение размеров двух окружностей, возникших перед моим взором, было совершенно аналогично отношению между размерами орбит Сатурна и Юпитера, а треугольник есть первая из геометрических фигур, подобно тому как Сатурн и Юпитер — первые планеты. Точно таким же образом я попытался получить второе расстояние — между Марсом и Юпитером — с помощью квадрата, следующее — с помощью правильного пятиугольника».

Гипотеза о том, что расстояния между планетами можно получить с помощью правильных многоугольников с последовательно возрастающим числом сторон, также не выдержала проверки и, кроме того, была неудовлетворительна, поскольку не объясняла числа известных тогда планет. Но «конец ее стал одновременно началом последней попытки, увенчавшейся успехом».

Вот как рассказывает об успехе своего предприятия Кеплер: «...Мне пришло в голову, что, следуя избранном путем, я никогда не смог бы дойти до Солнца (если бы соблюдал последовательность правильных многоугольников) и обнаружить причину, по которой планет должно быть 6, а не 20 или не 100... Я подумал, что если для [объяснения] размеров и пропорций шести орбит, принятых Коперником, необходимо было бы отыскать среди бесконечно многих фигур пять, отличающихся от других какими-то особыми свойствами, то возник бы произвол. И тут я устремился вперед с новыми силами. Какое отношение имеют плоские фигуры к пространственным орбитам? Тут скорее следовало бы обращаться к пространственным телам. Теперь, любезный читатель, ты знаешь мое открытие и предмет всей книги! Ибо как только человек, пусть даже плохо знающий геометрию, произнесет эти слова, ему на ум сразу же приходят пять правильных тел и свойственные им отношения размеров описанных и вписанных сфер, сразу же вспоминает он знаменитое дополнение Евклида к 18-му предложению из XIII книги, где доказано, что не существует и нельзя придумать более пяти правильных тел. Подумать только! Хотя я еще не имел ни малейшего представления о сравнительных достоинствах правильных тел, мне сразу же, на основе одной лишь догадки, при знании лишь известных расстояний между планетами, удалось достичь заветной цели — расположить тела так удачно, что позднее, когда я исследовал причины вещей, не нашлось ничего, что нуждалось бы в изменениях».

Далее следует формула открытия: «Земля *) есть мера всех орбит. Вокруг нее опишем додекаэдр. Описанная вокруг додекаэдра сфера есть сфера Марса. Вокруг сферы Марса опишем тетраэдр. Описанная вокруг тетраэдра сфера есть сфера Юпитера. Вокруг сферы Юпитера опишем куб. Описанная вокруг куба сфера есть сфера Сатурна. В сферу Земли вложим икосаэдр. Вписанная в него сфера есть сфера Венеры. В сферу Венеры вложим октаэдр. Вписанная в него сфера есть сфера Меркурия».

Вот в чем, по мнению 23-летнего Кеплера, состояла тайна мироздания: Вселенная оказалась устроенной на основе единого геометрического принципа! Но... не окажется ли радость преждевременной? Неудачи предыдущих попыток убедили Кеплера в необходимости серьезной проверки

*) В примечании ко второму изданию Кеплер поясняет, что имеется в виду орбита Земли.

каждой выдвигаемой гипотезы, и, сдерживая восторг, охватывающий его при мысли о чудесном открытии, Кеплер берет за проверку.

«...Теперь я уже не жалел о затраченном времени, не испытывал усталости от работы, не боялся сложных вычислений. Дни и ночи проводил я за расчетами, чтобы убедиться, совпадает ли закон, сформулированный мной лишь словесно, с орбитами Коперника, или же радость моя будет развеяна по ветру. На тот случай, если все придумано мной верно, в чем я не сомневался, я дал зарок при первой же возможности опубликовать этот чудесный пример божественной мудрости, чтобы люди могли с ним ознакомиться... Через несколько дней все сошлось».

Единый геометрический принцип позволил Кеплеру дать ответ на два из трех поставленных им вопросов: объяснить число известных тогда планет (если правильные тела «рассматривать как границы или перегородки..., то с их помощью можно разделить не более 6 предметов — отсюда и 6 планет, обращающихся вокруг Солнца») и вывести относительные расстояния между ними. Ответ на третий вопрос (о движении планет) оказался наиболее трудным и был получен лишь много лет спустя.

Итак, решение найдено и проверено. В общих чертах оно верно, необходимо лишь уточнить детали и получить ему обоснование. К последнему вынуждали Кеплера его философские взгляды. По мнению Кеплера, бог, «совершеннейший из строителей, с необходимостью должен был создать творение, обладающее безупречной красотой», руководствуясь, как и земные строители, числом и мерой. «Линия и поверхность не содержат в себе числа — здесь царит неограниченное. Пространственные тела — также. Неправильные тела надлежит выбросить из рассмотрения, ибо речь идет об основе наилучшим образом упорядоченного строения» В письме Местлину от 9 апреля 1597 г. Кеплер выражает эту мысль так: «Как глаз для цвета, как ухо для звука, так дух человеческий создан для познания не любых вещей, а количественных величин; он охватывает предмет тем полнее, чем ближе ему удастся приблизиться к чистым количественным величинам, лежащим в основе предмета. Чем дальше дух отходит от количественных величин, тем больше возникает неясностей и ошибок».

Иначе, все в этом прекраснейшем мире упорядочено настолько совершенно, что в нем не остается места для случайности. Все, в том числе и найденное Кеплером решение, должно иметь свои причины, и Кеплер принимается за выяснение этих причин с присущей ему тщательностью.

Прежде всего необходимо убедить читателя в правильности мало известного тогда и отнюдь не пользовавшегося всеобщим признанием учения Коперника. Сам Кеплер был «обращен» в коперниканство еще в студенческие годы.

О своем посвящении Кеплер рассказывает так: «Еще в то время, когда я в течение шести лет прилежно внимал в Тюбингене наставлениям знаменитого магистра Местлина, я почувствовал, насколько несовершенно во многих отношениях бытующее ныне представление о строении мира. Поэтому я был настолько восхищен Коперником, о котором мой учитель часто упоминал в своих лекциях, что не только неоднократно защищал коперниканские взгляды на студенческих диспутах, но и тщательно подготовил реферат на тему о том, что «первое движение» [вращение сферы неподвижных звезд] обусловлено суточным вращением Земли. При этом я исходил из того, что Земле следует приписать движение Солнца не только по математическим причинам, как это делал Коперник, но и по причинам физическим или, если угодно, метафизическим. С этой целью я стал исподволь собирать те преимущества, которыми обладал с математической точки зрения Коперник перед Птолемеем, черпая их отчасти из лекций Местлина, отчасти из своих собственных размышлений».

Первая глава «Тайны мироздания» называется «Причины, по которым коперниканское учение верно. Изложение этого учения». Выступать столь открыто в поддержку «еретического» учения до Кеплера не осмеливался

никто. Даже Местлин, охотно излагавший взгляды Коперника в своих лекциях, написал «Очерки астрономии» с позиций традиционной птолемеевской астрономии. Лишь наблюдая за печатанием «Тайны мироздания», Местлин, сославшись на недостаточно популярный характер изложения автора («... по себе он [Кеплер] судит о других, словно все люди, в руки которых попадет его книга, хорошо знакомы со сложным ходом рассуждений Коперника...»), присоединил к книге Кеплера своеобразный конспект труда Коперника «О вращениях» — так называемое «Первое повествование» Ретика. Не решался публично выступить в поддержку коперниканства и другой современник Кеплера — Галилей. В письме Кеплеру (а Галилей писал лично Кеплеру всего два раза) он открыто указывает причины своего молчания:

«...Вот уже много лет, как я разделяю воззрения Коперника и, руководствуясь ими, открыл причины многих явлений природы, не поддающихся объяснению на основе общепринятых гипотез. Много написал я на эту тему о прямых и косвенных доказательствах, однако до сих пор не отважился напечатать, испуганный судьбой самого Коперника, нашего учителя. У немногих снискал он бессмертную славу, бесконечно же многие (ибо так велико число глупцов) смеялись над ним и осистывали его. Я бы решился опубликовать ход моих рассуждений, если бы людей твоего разума было больше, но поскольку это не так, я подожду».

Свою убежденность в правильности учения Коперника Кеплер объясняет двумя причинами: во-первых, «прекрасным согласием между всеми небесными явлениями и взглядами Коперника» и, во-вторых, тем, что «лишь Коперник великолепнейшим образом обосновывает то, чему другие учат удивляться, и тем самым устраняет причину удивления, т. е. незнание сущности явления». Птолемеевская астрономия была бессильна объяснить, например, почему эпицикл Марса имеет огромные размеры по сравнению с эпициклами Юпитера и Сатурна, хотя деференты (окружности, по которым движутся центры эпициклов) этих планет гораздо больше деферента Марса; почему Марс, Юпитер и Сатурн в моменты противостояний с Солнцем должны находиться в перигеях своих орбит; почему движения Луны и Солнца никогда не бывают понятными и т. д. Все эти явления, как показал Кеплер, находят простое и естественное объяснение в рамках теории Коперника.

Далее Кеплер объясняет, почему правильные тела должны располагаться именно в открытом им порядке. Рассуждения Кеплера нам сейчас покажутся совсем лишенными логики, и мы склонны подозревать автора в нечестности, в попытке сбмануть читателя. Но Кеплер не мог быть нечестным; то, что нам кажется неуклюжей уловкой, для Кеплера служило убедительными аргументами.

С развитием науки изменяется не только ее конкретное содержание, но и ее язык и, что еще более важно, изменяется логика доказательства. Традиционное заключение *quod erat demonstrandum* («что и требовалось доказать») имеет совсем разный смысл у автора XVI века и у автора XX века. Читая сейчас Кеплера, надо не забывать об этом. Но Кеплер, перебирая разные доказательства, все же отдает в конце концов предпочтение сравнению теории с опытом. Ради такого согласия он много раз будет перестраивать свои взгляды. Согласно Кеплеру, все тела делятся на два класса: первичные (куб, тетраэдр, додекаэдр) и вторичные (икосаэдр, октаэдр).

В IV книге «Очерков коперниканской астрономии» относительно первичных тел говорится следующее: «В этих телах особенно ярко выражено метафизическое противопоставление равенства и различия. В кубе воплощено равенство, в двух других телах [тетраэдре и додекаэдре] — различие. Куб есть первое тело, возникающее при построе-

нии, тетраэдр — первое тело, получающееся при вырезании из куба, додекаэдр — первое тело возникающее при сложении образовавшихся тел...». Вторичные тела отличаются «от первичных в основном тем, что у них в одной вершине сходится более трех ребер...». Земля, на которой обитает венец творения — человек, заслуживает, чтобы ее поместили между первичными и вторичными телами.

Чувствуя, по-видимому, шаткость таких аргументов, Кеплер пытается найти и другие: «...Первичные правильные тела по своей натуре должны стоять, вторичные должны плавать. Если последние поставить на одну из граней, а первые на одну из вершин, то в обоих случаях глаз отвергнет столь уродливое зрелище».

И все же несправимый оптимист считает свою задачу решенной: «...Если какой-нибудь крестьянин спросит теперь тебя, какого сорта крюки поддерживают небо, так что оно не падает, тебе будет легко ему ответить». Через много лет во втором издании он с горечью замечает в этом месте: «Горе мне, как я страшно ошибаюсь!».

Фантазия автора не имеет преград. Ничто не ускользает от его внимания: ни замечательные свойства чисел, связанных с правильными телами, ни «аспекты», о которых мы еще будем говорить подробнее при обсуждении «Гармонии мира». И вдруг, посреди книги (в гл. 13), звучит неожиданное предостережение: «Сказанное до сих пор служит лишь для того, чтобы подкрепить правдоподобными аргументами открытый нами закон. Теперь же мы хотим перейти к определению планетных орбит и к геометрическим исследованиям. Если вычисленные значения не совпадут [*с приводимыми у Коперника*], то весь наш труд заведомо будет напрасным».

Прежде всего необходимо было решить вспомогательную геометрическую задачу: для каждого из пяти правильных тел найти отношение радиусов вписанной и описанной сфер. Приняв радиус описанной сферы за 1000 частей, Кеплер получил для радиусов вписанных сфер следующие значения: для куба — 577, для тетраэдра — 333, для додекаэдра — 795, для икосаэдра — 795 и для октаэдра — 577.

С этими данными можно было приступать к решению главной задачи — «астрономическому доказательству того, что между небесными сферами расположено пять правильных тел». Следовало лишь предварительно уточнить одну немаловажную подробность (о ней часто забывают): сферы, разделяющие орбиты, не могли быть бесконечно тонкими математическими сферами.

Небесные сферы должны обладать определенной толщиной; это обстоятельство не вызывало у физиков никаких сомнений: нужно было поместить между наружной и внутренней поверхностью шарового слоя («толстой сферы») эксцентрическую круговую орбиту планеты, столь необходимую для объяснения неравномерности движения планет (об эллиптической орбите еще не было и речи). Но Кеплер не соглашался с дальнейшими выводами: «Физики полагали, будто, начиная от самой внутренней из сфер — сферы Луны — и вплоть до десятой сферы *), нет никаких пустот, нет ничего, что бы не было заполнено сферами. Сферы эти должны непременно касаться друг друга: внутренняя сторона наружной сферы должна совпадать с внешней стороной ближайшей к ней внутренней сферы». Кроме того, птолемеявская астрономия ничего не говорила об относительных размерах сфер (говоря словами Кеплера, в ней «не на что было опереться при исследовании пропорций небесных орбит»). Опровергнуть же «слабые доводы физиков в пользу касания небесных сфер» сможет лишь тот астроном, который «с помощью наблюдений или построенных им гипотез сам воспарит к орбитам в небесное пространство» (ибо «нельзя возра-

*) Восьмая сфера — неподвижная звезда, девятая и десятая были введены для обозначения движения точки весеннего равнолетия (в системе Птолемея).

жать тем, кто пишет о Новой Индии, не пройдя эту страну насквозь сам!»). Из гипотезы же Коперника и предположения о годовом движении Земли следовало, что между соседними сферами должны быть пустые промежутки.

Например, «если среднее расстояние от Земли до центра мира положить равным 60, то среднее расстояние от Венеры до центра мира составит $43\frac{1}{6}$, так что разность будет равна $16\frac{5}{6}$. В перигее Земля приближается к Венере на $2\frac{1}{2}$. Венера в апогее также приближается к Земле на $2\frac{1}{2}$. Следовательно, в целом происходит сближение на 5 единиц. Расстояние же между обеими планетами даже в момент их наибольшего сближения останется равным 12».

Физическая интуиция Кеплера восставала против пространства, сплошь заполненного небесными сферами. «Зачем природе такая расточительность? — восклицает он. — Сколь нелепа и бесполезна была бы она! Сколь мало привыкли мы встречать ее в природе!»

С трепетом выносит Кеплер свои результаты «на суд астрономии». Эти результаты, представленные в виде таблицы, — одно из первых сравнений модели с опытом, опубликованных в научной литературе.

Опытными данными здесь служат значения радиусов сфер планет, вычисленных Коперником из данных наблюдений. Соотношение между наружной поверхностью сферы и внутренней поверхностью следующей сферы определяется из геометрии. Толщина сферы, определенная Коперником, задается разностью апогелия и перигелия планеты.

Радиус внутренней поверхности сферы = 1000 долей	Радиус наружной поверхности соседней сферы.	
	по Кеплеру	по Копернику (книга V)
Сатурн	Юпитер 577	635
Юпитер	Марс 333	333
Марс	Земля 795	757
Земля	Венера 795	794
Венера	Меркурий 577 или 707	723

Согласие модели, с нашей точки зрения, не плохое. А ведь модель Кеплера не имела никаких оснований; открытые впоследствии три внешние планеты (Нептун, Уран и Плутон) и пояс астероидов и вовсе лишили эту модель смысла. Так природа преподавала физикам урок бдительного отношения к простым моделям. Кеплера, однако, раздражала последняя строка таблицы. Он на ходу исправляет правила игры, когда дело доходит до орбиты Меркурия.

Вычисленное «по правилам» значение не подошло. Тогда Кеплер дает для Меркурия второе значение, которое получается, если взять не радиус вписанной сферы, а радиус сферы, касающийся середин ребер октаэдра (а не центров его граней). «Это число, — замечает Кеплер, — не слишком сильно отличается от 723». Разумеется, столь явное отступление от общего правила нуждается в обосновании, и Кеплер посвящает разбор (малоубедительному для нас) исключительного случая специальную главу. Об этой главе во втором издании он напишет, что «это все неверно», «все рассуждения здесь ошибочны». Но все-таки совпадение достаточно удовлетворительное и, как говорит сам Кеплер, «соответствующие числа весьма близки друг к другу. У Марса и Венеры они равны. У Земли и Меркурия отличаются не так уж сильно. Лишь у Юпитера числа расходятся больше, что, впрочем, неудивительно, если принять во внимание чудовищное расстояние [до него]».

«Нетрудно видеть, — замечает Кеплер, — сколь велико было бы различие между числами, если бы наш опыт противоречил природе небес, т. е. если бы бог при сотворе-

нии мира руководствовался иными числовыми пропорциями. Столь близкое соответствие числовых пропорций, свойственных правильным телам, и расстояний между планетами, разумеется, не могло быть случайным...

Похожее обоснование и после Кеплера часто принимается за доказательство. Но, убеждая читателя, сам Кеплер не мог оставаться равнодушным, зная об остающихся небольших расхождениях. Устранить эти расхождения, оставаясь в рамках своей геометрической модели строения мира, Кеплер не мог: схема не содержала свободных параметров, варьируя которые можно было бы подогнать результаты.

Прежде всего он обратил внимание на то, что решаемая им задача отличается от той, которую ставил перед собой Коперник. Труд Коперника «О вращениях небесных кругов» носил характер скорее космографического, чем астрономического исследования. Небольшим ошибкам в относительных расстояниях Коперник не придавал особого значения.

Кроме того, хотя Коперник на словах и считал центром мира Солнце, однако он, «чтобы сократить вычисления и не слишком запугивать усердных читателей чрезмерно большими отклонениями от Птолемея, вычислял наибольшие и наименьшие расстояния... и положения точек наибольшего и наименьшего удаления планет [известных под названием «афелий» и «перигелий»] относительно не центра Солнца, а центра орбиты Земли, словно последний был центром Вселенной...» *).

Поверив в данные Коперника, Кеплер был бы вынужден считать, что эксцентрическое расстояние, т. е. расстояние Солнца до центра орбиты Земли, равно нулю (в то время как эксцентрические расстояния других планет, т. е. расстояния центров их орбит от центра орбиты Земли, оставались бы по-прежнему отличными от нуля), и, значит, предположить, что «сфера Земли в отличие от [сфер] других планет не обладает толщиной. Но тогда центры граней додекаэдра и вершины икосаэдра лежали бы на одной сфере и весь мир выглядел бы более сжатым и сплюснутым». Такие исправления модели были мало приемлемы для Кеплера, ибо они отводили Земле особую роль среди других планет.

Оставалось одно: пересчитать данные Коперника, приняв за центр мира центр Солнца. Эту трудоемкую работу по просьбе Кеплера охотно согласился выполнить его бывший учитель Местлин. Различия, как и следовало ожидать, оказались довольно существенными. Например, «для Венеры различие [в положении линии апсид] составило более трех знаков зодиака [т. е. более 90°], ибо ее афелий [точка орбиты, ближайшая к Солнцу] лежит в Тельце и Близнецах, а ее апогей [точка орбиты, ближайшая к Земле] — в Козероге и Водолее».

Различными оказались не только расстояния, но и годовые параллаксы планет в афелии, вычисленные тремя способами: 1) из схемы расположения правильных тел, 2) по коперниканским расстояниям от Солнца, 3) снова по теории Кеплера, но уже с Луной, включенной в сферу Земли (что привело к увеличению толщины земной сферы). Особенно сильно отличались результаты для Марса ($40^\circ 9'$, $37^\circ 22'$, $37^\circ 52'$) и Венеры ($49^\circ 36'$, $47^\circ 51'$, $45^\circ 33'$).

Столь явные расхождения не поколебали уверенности Кеплера в правильности предложенной им схемы строения мира, но могли произвести

*) Это обстоятельство часто ускользает от многих авторов. Для Коперника движение планет не требовало какой-либо причины и происходило (как бы мы сказали сейчас) по инерции. Поэтому для него Солнце не было центром силы и положение Солнца вовсе не обязано было совпадать с центром орбиты Земли. То, что центр планетной системы не был связан с каким-либо материальным телом, не казалось ему странным. Только Кеплер, размышляя об источнике движущей силы планет, понял роль Солнца. Именно эта идея помогла ему постепенно распутать механику планет.

невыгодное впечатление на читателей «Тайны мироздания» и даже подорвать доверие к новой теории. Понимая это, Кеплер предпринимает обстоятельный разбор возможных причин несовпадения результатов.

Прежде всего необходимо было выяснить, насколько надежны вычисления. Местлин в своих расчетах пользовался так называемыми «Прусскими таблицами», составленными Рейнгольдом на основе модели Коперника в 1551 г. *) Кеплер весьма скептически оценил надежность этих таблиц: при вычислении положений планет они, по его словам, «нередко приводят к ошибкам», содержат «не внушающие доверия» значения эксцентрических расстояний для планет и вообще настолько грубы, что подчас не позволяют достичь точности, превышающей $1/2$ градуса.

Данные Коперника также не были достаточно надежными. Поэтому обнаруженные противоречия не подкрепляли теории Коперника, но их все же нельзя было считать решающими для ее дискредитации. Оставалось испробовать другой путь и получить данные об относительных расстояниях между планетами с помощью соображений, выходящих за рамки геометрии правильных тел. Необходимые сведения (а заодно и ответ на третий вопрос, сформулированный в «Тайне мироздания») Кеплер надеялся получить из рассмотрения «пропорций между движениями и орбитами» небесных тел. Эта идея (предназначенная для спасения модели) оказалась поистине счастливой.

Рассуждения Кеплера сводились, по-видимому, к следующему. Трудность состояла в том, что не было уверенности в правильности полученных значений расстояний. Прямые наблюдения не давали надежных значений. Позже Кеплер, изучая движение Марса, понял, как надо правильно производить «триангуляцию неба», но сейчас его увлекает другая идея. Если нельзя измерить расстояния непосредственно, то нельзя ли найти косвенный метод такого измерения? В самом деле, если расстояния планет подчинены какому-то порядку, то и времена их обращения не могут быть случайными: ими должен управлять какой-то простой закон, который бы устанавливал зависимость между периодами обращения и расстояниями. Тогда вычисление радиусов сводилось бы просто к подстановке соответствующих периодов, которые известны с большой точностью. Но зависимость между радиусами и периодами обращения никто не анализировал. Следовательно, ее необходимо установить.

Проверка показала, что периоды не пропорциональны радиусам орбит, ибо «хотя отношение периодов и подобно отношению расстояний», но все же отличается от последнего. Для такого расхождения должна быть причина, и Кеплер выдвигает две гипотезы: либо движущие силы самих планет (Кеплер писал «душа») ослабевают по мере удаления от Солнца, либо «существует лишь одна движущая сила [опять «душа»], исходящая из центра всех орбит, т. е. из Солнца, и действующая на тела тем сильнее, чем ближе они подходят к Солнцу». Кеплер останавливается на второй гипотезе.

Во втором издании Кеплер делает два примечания:

«1. То, что такие души [планет] не существуют, я доказал в моей «Новой астрономии».

2. Если мы заменим слово «душа» словом «сила», то мы получим как раз тот принцип, который лежит в основе физики неба в «Новой астрономии». Сначала я верил твердо, что движущей силой планет служит душа... Сейчас, когда я понял, что причина движения убывает в пропорции к расстоянию, так же как свет от Солнца ослабевает в пропорции к расстоянию от Солнца, я пришел к заключению, что эта сила должна

*) Эти таблицы пришли на смену таблицам Альфонсос, которыми пользовались с XIII века.

быть чем-то вещественным, вещественным не в буквальном смысле этого слова, но... в том же смысле, в каком мы говорим о вещественности света, понимая под этим невещественную сущность, испускаемую вещественным телом».

«Если бы увеличение периода, — говорит он, — было связано лишь с увеличением размеров орбиты, то движения относились бы друг к другу так же, как средние расстояния». Но столь простое соотношение между периодом обращения и радиусом орбиты искажается под действием силы, исходящей от Солнца и убывающей с расстоянием. «С большой вероятностью можно предположить, что действие Солнца [на движение планет] подчиняется тем же закономерностям, что и свет. Как происходит ослабление света, исходящего из точки, нас учит оптика. На малую окружность [проведенную вокруг Солнца] приходится такое же количество света или солнечных лучей, как и на большую. На малой окружности свет плотнее, на большой — разреженнее. Меру ослабления как света, так и движущей силы следует искать в отношении окружностей. Орбита Венеры больше орбиты Меркурия, поэтому Меркурий движется с большей силой, поспешнее, проворнее, стремительнее, чем Венера. Однако чем длиннее орбита, тем больше времени требуется планетам, чтобы совершить оборот, даже если на них действуют одинаковые движущие силы. Следовательно, увеличение расстояния от планеты до Солнца двояким образом влияет на увеличение периода ее обращения...»

Далее Кеплер формулирует ошибочную (но исправленную им же самим во втором издании) зависимость между радиусами R_1 и R_2 и периодами T_1 и T_2 двух планет:

$$T_1 : \frac{T_1 + T_2}{2} = R_1 : R_2.$$

Эта зависимость, предвосхищение знаменитого третьего закона, позволила ему вычислить относительные расстояния между планетами. Результаты получились следующие (здесь опять данные Коперника считаются экспериментальными).

Планеты	Относительные расстояния по Кеплеру	Относительные расстояния по Копернику
Юпитер : Сатурн	0,574	0,572
Марс : Юпитер	0,274	0,290
Земля : Марс	0,694	0,658
Венера : Земля	0,762	0,719
Меркурий : Венера	0,563	0,500

«Мы видим, как близко нам удалось подойти к истине», — с радостью констатировал Кеплер. Но совпадение все же не было полным, и Кеплер не может успокоиться. С тревогой задает он вопрос: «Доживем ли мы до того дня, когда оба ряда чисел удастся привести в полное соответствие друг с другом?»

Такой день настал, хотя и не очень скоро. Почти четверть века понадобилась Кеплеру, чтобы прийти к открытию III закона движения планет. В примечании ко второму изданию «Тайны мироздания» Кеплер с гордостью отмечает: «Мы дожили до такого дня через 22 года, и нас, по крайней мере меня, это радует. Думаю, что Местлин и многие другие, читавшие V книгу «Гармонии мира», разделяют мою радость». И в том же втором издании:

«Если мои числа оказались близкими к действительности, это произошло случайно... Может быть, и не стоило печатать эти замечания. Но сейчас мне доставляет удовольствие вспомнить, как много крутых дорог пришлось мне пройти, на какое количество стен я наткнулся во тьме моего невежества, пока наконец я не нашел дверь, выведшую меня на свет... Так я мечтал об истине».

Работа над «Тайной мироздания» оставила Кеплера полным творческих планов. В голове его рождается замысел грандиозного нового труда. В письме канцлеру Баварии Херварту фон Хоэнбургу от 14 декабря 1599 г. Кеплер сообщает: «...Я уже разработал метод и сделал первые наброски к книге *«De Harmonice Mundi dissertatio cosmographica»* [«Космографическое исследование о гармонии мира»]. В ней будет пять частей или глав: первая, геометрическая, — о фигурах, которые можно построить с помощью циркуля и линейки; вторая, арифметическая, — о числовых пропорциях, свойственных правильным многогранникам; третья, музыкальная, — о причинах гармоний; четвертая, астрологическая, — о причинах аспектов; пятая, астрономическая, — о причинах периодических движений...».

Однако смелому замыслу мешало серьезное обстоятельство: Кеплеру не хватало точных наблюдательных данных. Он не мог удовлетвориться скудным запасом сведений, какие были у Коперника. Сам Коперник добавил к списку древних наблюдения лишь 27 звезд. Лишь один человек в Европе располагал в то время необходимыми сведениями. Имя его было Тихо Браге.

Аристократ по рождению и ученый по призванию, знаменитый датский астроном Тихо Браге первым понял важность систематических наблюдений. Достигнутая им точность наблюдений (без телескопа!) не только намного превосходила точность наблюдений его предшественников, но и в течение долгого времени оставалась недостижимой для потомков.

«...Все должны смолкнуть и внимать Тихо, — писал Кеплер Херварту фон Хоэнбургу (9/10 апреля 1599 г.), — который отдал наблюдениям 35 лет жизни и своими глазами видел больше, чем многие другие — всей остротой своего разума. Любои его инструмент стоит больше, чем все мое имущество и имущество всех моих родных. По сравнению с ним Птолемей, Альфонс и Коперник выглядели бы просто мальчишками, если бы Тихо не имел обыкновения приписывать им большую часть своих знаний и идей, послуживших толчком к его открытиям...»

Тихо был не только астрономом-наблюдателем (притом лучшим астрономом-наблюдателем своего времени), он выступал и как астроном-теоретик, правда с гораздо меньшим успехом. Убедившись на собственном многолетнем опыте в несовершенстве птолемеевой астрономии и не признавая в то же время теорию Коперника, Браге выдвинул свою схему устройства мира, носившую смешанный гео-гелиоцентрический характер. По мысли Браге, все планеты (кроме Земли) должны были обращаться вокруг Солнца, которое в свою очередь обращается вокруг Земли.

В письме Местлину, написанном вскоре после смерти Браге (Браге умер 20 декабря 1601 г., когда ему было 55 лет), Кеплер так охарактеризовал научное творчество Браге: «Все, что совершил Тихо, он совершил до 97-го года... Главным достижением Тихо были его наблюдения, составившие столько объемистых томов, сколько лет он отдал своей работе. Но и его *«Progymnasmata»* [«Основные начала»] поистине благоухают амброзией... Обо всех планетах Тихо учил верно и проводил тщательные исследования, но в основном, как и Коперник, *mutatis mutandis* на манер Птолемея. Отсюда ты можешь видеть, как бог распределяет свои дары: никому из нас не дано всего. Тихо выполнил такую же миссию, что и Гиппарх: он заложил фундамент здания и проделал при этом огромную работу. Но один человек не в силах выполнить всего. Гиппарху понадобился Птолемей, который построил теорию пяти остальных планет».

Мы не можем здесь останавливаться на запутанной цепи событий, предшествовавших встрече Кеплера и Браге, переезду Кеплера вместе

с семьей в Прагу и началу совместной работы обоих титанов. Напомним только, что трудный союз их был очень недолгим. Он длился всего полтора года. Отношения между Браге и Кеплером с самого начала складывались далеко не безоблачно. Слишком разные задачи ставили они для себя. Браге высоко ценил тонкий аналитический ум и познания своего молодого «собрата по наблюдениям небес», а Кеплер усматривал необычайную для себя удачу в возможности работать с «князем астрономии», «нашим фениксом». Уже после смерти Браге Кеплер писал Местлину: «...Если господь бог хоть немного радеет об астрономии, а думать так велит благочестие, то я надеюсь достичь в этой области кое-каких результатов, ибо вижу, как бог неразрывными узами связал мою судьбу с Тихо и не допустил, чтобы мы расстались даже после тяжелейших ссор».

Послав экземпляр «Тайны мироздания» Браге, Кеплер надеялся получить вместе с отзывом и столь интересовавшие его данные относительно эксцентриситетов орбит и расстояний между орбитами. Но Браге намеревался использовать свои наблюдения для подтверждения правильности собственной модели мира и не спешил делиться накопленными сокровищами.

Раздосадованный неожиданным препятствием, Кеплер пишет Местлину (26 февраля 1599 г.): «Вот мое мнение о Тихо. Он богат сверх меры, но, подобно большинству богачей, не знает, что делать со своим богатством. Необходимо поэтому взять на себя труд (что я и сделал с подобающей деликатностью) и лишить его накопленных богатств, вынудить без утайки опубликовать наблюдения, и притом все».

Не принесла желаемого результата и личная встреча с Браге в его новой обсерватории в Бенатеке под Прагой. В письме Херварту фон Хоэнбургу от 12 июля 1600 г. Кеплер сообщает: «Я бы уже закончил свои исследования гармонии мира, если бы астрономия Тихо не захватила меня настолько, что я чуть было не сошел с ума».

...Одной из важнейших причин моего визита к Тихо было желание получить от него более точные значения эксцентриситетов, чтобы с их помощью проверить «Тайну мироздания» и уже упоминавшуюся «Гармонию мира», ибо априорные умозаключения должны не противоречить очевидному, а, наоборот, находиться в согласии с ним. Узнать что-либо у Тихо мне так и не удалось. Лишь за обедом в застольной беседе он между прочим упоминал сегодня — апогей одной планеты, завтра — узлы другой».

Для Кеплера, всегда щедро делившегося не только готовыми результатами, но и замыслами будущих работ, мысль о лежащих под спудом точнейших числах была невыносима. Визит в Бенатек убедил Кеплера также и в том, что одному Браге не под силу справиться с обработкой огромной массы наблюдений.

«Тихо обладает лучшими наблюдениями и, следовательно, материалом для возведения здания, — писал Кеплер. — У него есть работники и все необходимое. Недостает ему лишь архитектора, который использовал бы все это в соответствии с его же, Тихо, замыслом. Ибо, сколько ни счастлив даром Тихо и сколь он ни искусен в архитектонике, все же разносторонность задач и то обстоятельство, что истина подчас бывает запрятана довольно глубоко, препятствуют его успехам. К тому же начинает сказываться и возраст, ибо дух и силы его ослабели или ослабеют через несколько лет настолько, что ему станет трудно делать все самому».

Кто же должен стать архитектором, чтобы из наблюдений Браге построить прекрасное здание новой астрономии? На этот счет у Кеплера не было никаких сомнений: не случайно же он, Иоганн Кеплер, прибыл

в Бенатек именно в то скорое время, когда ассистент Браге Христиан Северин Лонгомонтанус пытался (без заметных успехов) построить теорию движения Марса. «Если бы Христиан занимался какой-нибудь другой планетой, — сообщает Кеплер, — то и мне пришлось бы заняться ею». Во всем ходе событий Кеплер видел смысл:

«...Вновь усматриваю волю провидения в том, что прибыл как раз в то время, когда он занимался Марсом. В противном случае нам не удалось бы прийти на основе... наблюдений к познанию тайн астрономии, и они навсегда остались бы сокрытыми от нас».

Марс был всегда планетой необычайно своенравной, и бедному Лонгомонтанусу никак не удавалось достичь удовлетворительного согласия с наблюдениями. Убедившись в незаурядных способностях своего нового помощника, Браге решил поручить Марса попечению Кеплера (не забыв при этом взять с последнего клятву хранить в тайне доверенные ему данные), а Лонгомонтанусу поручить теорию Луны.

Кеплеру, считавшему себя уже не новичком в астрономических вычислениях, новая задача поначалу показалась не слишком трудной, и он даже заключил пари, опрометчиво пообещав завершить теорию Марса за восемь дней.

Мы не знаем, какой была ставка, но знаем, что пари Кеплер проиграл. Работа над теорией Марса вместо обещанных восьми дней заняла (правда, с перерывами) почти шесть лет.

«Плоды титанических усилий были опубликованы лишь в 1609 г. в книге, которая называлась «Новая астрономия, опирающаяся на изучение причин, или физика небес, изложенная в комментариях о движениях планеты Марс на основе наблюдений благородного Тихо Браге по приказанию и попечением Рудольфа II, императора римского и проч., в течение многолетних упорных исследований разработанная в Праге математиком его святого императорского величества Иоганном Кеплером».

Кеплеру удалось сделать то, что не удавалось никому из его предшественников, — «заковать Марс в цепи вычислений».

В посвящении, представляя императору Рудольфу II побежденный Марс, Кеплер в аллегорической форме рассказывает о перипетиях многолетней «войны» с ним. С торжеством победителя говорит он о дурной славе, которую снискал его «высокородный пленник» у астрономов:

«Он [Марс] неизменно одерживал верх над человеческой интуицией, издевался над всеми ухищрениями астрономов, разрушал все, что они создавали, разбивал вражеские войска наголову. Тайну своего могущества он хранил на протяжении всех прошедших веков и совершал свой путь, ничем не ограничивая своей свободы, что дало жрецу природы, известнейшему из латинян Плинию повод воскликнуть: Марс — планета, не поддающаяся наблюдениям!»

Не менее красочен и другой приводимый Кеплером пример трудности построения теории Марса — случай, который, по преданию, произошел с Георгом Иохимом Ретиком, «известнейшим из учеников Коперника, который первым отважился сделать обновление астрономии целью своих желаний и стремился достичь задуманного «с помощью наблюдений и немаловажных идей».

Ретик, гласит предание, отчаявшись разобраться в движениях Марса, обратился к своему ангелу-хранителю с просьбой, чтобы тот помог ему постичь истину. Выведенный из себя назойливыми приставаниями, ангел-хранитель схватил своего подопечного за волосы и стал бить его головой о потолок и швырять о пол, приговаривая: «Вот тебе теория Марса!»

«Предание — существо злое,— добавляет Кеплер — Ничто не может нанести добру имени большего ущерба, чем оно, ибо вымысел и небывицу предание передает столь же неукоснительно, сколь провозглашает истину. Однако вполне возможно, что смущенный дух Ретика впал в неистовство от того, что спекуляции Ретика не привели к успеху, и голова его сама начала биться о стену. Нужно ли удивляться, что Ретика, дерзнувшего исследовать движения Марса, постигла та же участь, что и императора Октавия Августа, который потратил пять своих легионов под командованием Квинтилия Вара, попавших в окружение к противнику Августа Арминию, отпрыску германского бога войны»

Сам Кеплер не доверял слухам о непобедимости Марса, считая их преувеличенными, и «всегда помышлял о пути к победе».

Первым против грозного противника выступил Тихо Браге, который своими наблюдениями подготовил грядущую победу.

«Совершенно особой хвалы,— пишет Кеплер,— заслуживает усердие Тихо Браге, верховного главнокомандующего в этом походе. При поддержке королеи Дании Фредерика II и Христиана, а в последнее время и вашего императорского величества [Рудольфа II], он по ночам на протяжении 20 лет без перерыва разведывал все обычаи нашего противника, его военные хитрости, раскрывал все его намерения и перед смертью изложил все это в своих книгах».

Вооруженный наблюдениями Браге, Кеплер сменил его на посту «верховного главнокомандующего».

Борьба с коварным противником протекала с переменным успехом. «Часто не хватало боевых машин, причем именно в тех местах, где они были особенно нужны,— сообщает Кеплер — Неумелые возницы доставляли их окольными путями с большими запозданиями и ценой огромных затрат. Враг, изученный еще недостаточно хорошо, оказывался порой не там, где я ожидал. Солнце и Луна слепили наводчиков, плотные облака временами закрывали цель. Еще чаще выпущенные ядра отклонялись в сторону из-за сырого воздуха»

Иногда к логову неприятеля удавалось подойти почти вплотную, но успешному штурму мешали «*косо поставленные стены ошибочных выводов*». Противник защищался необычайно упорно и изобретательно. Стоило взять один его бастион, как он тотчас же возводил новый, для одоления которого старых средств было недостаточно и приходилось изыскивать новые. Сказывались несчастья и беды в собственном лагере: «потеря доблестного главнокомандующего, раздоры, поветрия и болезни». Домашние дела, «приятные и неприятные», также отнимали время.

Наконец, противник, не выдержав настойчивого преследования, стал подумывать о заключении мира (правда, не раньше чем убедился, что «во всей империи у него не осталось ни одного надежного убежища») и запросил пощады. Посредником на переговорах об условиях капитуляции выступила «мать-природа». Выговорив себе свободу в пределах, допускаемых добровольно надетыми путами, Марс «под конвоем арифметики и геометрии, бодрый и веселый», направился в плен — в лагерь победителя.

Велики были трофеи, захваченные Кеплером в изнурительном «поединке» с Марсом. Кеплер не только открыл два закона движения планет (сначала тот, который мы называем вторым, затем — первый), обессмертившие его имя, но и доказал плодотворность принципиально нового — физического — подхода к изучению небесных явлений.

Выводы и методы «Новой астрономии» своей новизной и смелостью могли испугать читателя, воспитанного в духе старой астрономии (ибо они означали разрыв с традицией двухтысячелетней давности!), и Кеплер решает двигаться постепенно, заставляя читателя проделывать весь тот путь от старого к новому, который пришлось проделать ему самому.

«Речь ведь идет не только о том, каким образом проще всего ввести читателя в существо излагаемого предмета, — поясняет он избранную манеру изложения. — Важно другое: по какой причине, с помощью какого хитроумного приема или счастливой случайности мне, автору, удалось прийти к тому, к чему я пришел. Когда Христофор Колумб, Магеллан и португальцы (первый открыл Америку, второй — Китайский океан, а третий — морской путь вокруг Африки) повествуют о том, как они сбивались с пути, мы не только не осуждаем их, но, наоборот, боимся пропустить что-нибудь из их рассказов — столь большое удовольствие доставляет нам их чтение. Поэтому и мне не поставят в вину, если я из любви к читателю воспользуюсь в своей работе тем же приемом. Читая о похождениях аргонавтов, мы не испытываем перенесенных ими тягот, в то время как трудности и тернии на пути моей мысли, к сожалению, вполне ощутимы для читателя. Таков уж удел всех математических сочинений. Подобно тому, как одни люди испытывают удовольствие от одного, другие — от другого, найдутся и такие, которые испытают сильнейшую радость, когда, преодолев все трудности для понимания места, они единым взглядом смогут охватить цепь моих открытий».

Кеплер начинает издалека — с того, как астрономы научились «отличать первое движение планет от второго, или собственного», и как при рассмотрении второго движения обнаружили два неравенства — первое и второе.

«О том, что движения планет кругообразны, — говорит Кеплер, — свидетельствует их непрестанная повторяемость. Разум, извлекающий эту истину из опыта, сразу же заключает отсюда, что планеты обращаются по идеальным кругам, ибо среди плоских фигур — круг, среди пространственных тел — небесная сфера считаются совершеннейшими. Однако при более внимательном рассмотрении оказывается, что опыт учит несколько иному, а именно: орбиты планет отличаются от простых кругов. Поскольку подобное заключение вызывало величайшее удивление, люди в конце концов были вынуждены заняться выяснением причин указанного отклонения.

Так появилась астрономия, цель которой люди усматривали в указании причин, по которым движения светил с Земли кажутся беспорядочными, в то время как на небе они подчинены строгому порядку, в исследовании кругов, по которым обращаются светила, и в предсказании положения светил и небесных явлений для произвольного момента времени».

Для древних астрономов, не знавших различия между первым и вторым движением, орбиты небесных тел представлялись запутанными («как нити в клубке») и сложными.

«Эти наивные взгляды астрономии, — не без сарказма отмечает Кеплер, — основанные не на объяснении явлений причинами, а на грубых наблюдениях, не представимых в виде фигур и чисел и не приложимых к будущему (ибо они никогда не повторяются — продолжительность одного оборота отличается от продолжительности другого, один виток орбиты никогда не переходит в другой виток тех же размеров), — эти взгляды, говорю я, и в наши дни пытаются оживить некоторые из жаждущих снискать себе признание у толпы, не без успеха находящие его у непосвященных. К счастью, те, кто сведущ в астрономии, считают, что такие люди либо валяют дурака, либо, как говаривал о философах Петрицци *), сами являются дураками при всем их разуме».

Размышляя над удивительно сложным ходом небесных светил, астрономы постепенно поняли, что видимые с Земли движения в действительности являются суперпозицией «двух простых движений, первого и второго, общего и частного».

*) Петрицци — средневековый философ.

«Под первым движением понимают поворот всего неба со всеми звездами с Востока через Юг на Запад и с Запада через нижнюю часть неба на Восток, происходящий за 24 часа. Второе движение — это движения отдельных планет с Запада на Восток, происходящие за более продолжительные промежутки времени».

Отделив первое движение от второго, астрономы обнаружили, что во втором движении можно выделить два так называемых неравенства: первое — непостоянство угловой скорости планеты (одинаковые дуги планета проходит за различное время), второе — непостоянство направления движения планеты (стояния и попятные движения). Были разработаны и методы, позволявшие учитывать оба неравенства.

Так, в астрономии Птолемея для объяснения первого неравенства использовался эксцентрический круг (эксцентр), для объяснения второго — эпицикл.

Следуя величайшему авторитету древности и средних веков Аристотелю, астрономы (причем не только Птолемей и его современники, но и Коперник и, разумеется, Браге) наделяли круговые движения особыми свойствами. По их мнению, возвышенная природа всего небесного, а следовательно, и планет, требовала, чтобы величайшие небесные светила обращались по кругам равномерно, не ускоряя и не замедляя своего бега. Всякое нарушение равномерности движения (любое неравенство) противоречило представлению об идеальном порядке, господствующем на небе, и объявлялось кажущимся, мнимым.

Непостоянство угловой скорости планеты (первое неравенство) в астрономии Птолемея объяснялось неудачным выбором точки наблюдения — смещением Земли относительно центра «экванта» A , из которого движение планеты представлялось бы равномерным. Для объяснения движения Солнца оказывалось достаточно «простого эксцентра» — иначе говоря, предполагалось, что центр круговой орбиты O Солнца совпадает с центром экванта A . В более сложных случаях (например, при рассмотрении движения Марса) схема движения оказывалась не столь простой. Чтобы достичь согласия с наблюдениями, приходилось вводить гипотезу, согласно которой три точки: центр Вселенной, совпадающий с центром Земли T , центр экванта A и центр круговой орбиты планеты O — лежат на одной прямой и не совпадают одна с другой. Непостоянство угловой скорости планеты объяснялось тем, что Земля (T) и центр экванта A лежат по разные стороны от центра O круговой орбиты планеты. Поэтому из точки T движение планеты кажется наиболее медленным в афелии и наиболее быстрым — в перигелии.

При построении теории Марса в астрономии Птолемея приходилось вводить еще одну гипотезу: считать, что $TO = OA$. (Единственным аргументом в пользу такой гипотезы была ссылка на аналогию между движением Марса и движениями внутренних планет — Меркурия и Венеры.)

Для объяснения второго неравенства (стояний и попятных движений) Птолемей предложил воспользоваться эпициклом, т. е. представлять движение планет как результат суперпозиции двух круговых движений: равномерного обращения планеты по окружности — эпициклу и обращения центра эпицикла по другой окружности — деференту (полный оборот центра эпицикла должен происходить за сидерический период обращения планеты). При этом радиус-вектор, проведенный из центра эпицикла к планете, в любой момент времени должен был быть параллелен радиусу-вектору, проведенному из центра солнечного экванта к так называемому среднему Солнцу (это справедливо для верхних

планет). Последнее Кеплер определяет так: «Истинное положение Солнца — то место, где мы видим Солнце вследствие неравенства его движения, среднее — то, где оно находилось бы, если бы никакого неравенства не было», т. е. если бы Солнце двигалось равномерно.

В теории Коперника необходимость во введении эпицикла для объяснения второго неравенства отпадала: стояния и попятные движения получали более простое и естественное объяснение. Они считались обусловленными тем, что наблюдения за движением планет производятся из движущейся обсерватории — с Земли. Однако эпициклы все же понадобились Копернику, хотя и для другой цели — для объяснения первого неравенства, так как орбиты планет считались по-прежнему круговыми. Предметом особой гордости Коперника служило то обстоятельство, что все круговые движения (планеты по эпициклу и центра эпицикла по большой окружности) были равномерными. В этом Коперник усматривал исправление ошибки Птолемея, возврат к «истинным принципам» движения.

Коперник, подходивший к изучению движений планет с позиций чистого математика, полагал, что его эпициклы полностью эквивалентны птолемеевскому экванту. Кеплер пришел к иному выводу. Продемонстрировав с помощью простого геометрического построения качественную эквивалентность обоих способов объяснения первого неравенства, он в то же время не оставил без внимания и небольшого различия в положении планеты, вычисляемого по рецептам теорий Птолемея и Коперника (различия в формуле для угла — истинной аномалии). И хотя далее мы еще не раз столкнемся с поразительной наблюдательностью Кеплера и его необычайным «вниманием к мелочам», это первое проявление замечательного дара великого астронома не может не вызвать восхищения, ибо Кеплер (если воспользоваться современной терминологией) заметил расхождение в третьем порядке теории возмущений по эксцентриситету Марса.

Доказанная Кеплером приближенная эквивалентность кинематических схем, используемых в теориях Птолемея и Коперника для объяснения первого неравенства, отнюдь не означала, что Кеплер считает эквивалентным физическое содержание этих теорий. С точки зрения творца новой науки — физики небес, — теория Коперника обладала неоспоримыми преимуществами и перед древним учением Птолемея, и перед новой теорией Браге.

На этот счет Кеплер высказывается (во введении) со всей определенностью: «...Различие между тремя воззрениями в отношении их физического содержания обнаруживается хотя и с помощью гипотез, но зато таких, которые по своей достоверности не уступают гипотезам врачей о функциях частей человеческого тела или другим физическим гипотезам».

Но и лучшая из теорий — коперниканская — была далека от совершенства и нуждалась в исправлениях.

Коперник не видел ничего странного в том, что в его теории центром Вселенной служит не материальное тело, а некоторая «пустая» точка — центр круговой орбиты Земли. Уверенность в правильности своего построения он черпал в ссылке на высокий авторитет Птолемея, у которого планеты, двигаясь по эпициклам, также обращались вокруг «нефизической» точки.

Для Кеплера, считавшего, что «математическая точка, даже если она является центром Вселенной, не может ни сдвинуть тяжелое тело, ни притянуть его к себе», такой выбор центра Вселенной был неприемлем. В своей первой работе «Тайна мироздания» он высказал убеждение, что источни-

ком движения планет является Солнце. По мнению Кеплера, именно Солнце, причем не воображаемое «среднее», а реальное, «истинное», должно находиться в центре Вселенной. Отсюда сразу же следовал необычайно важный практический вывод: круговые орбиты надлежало определять, наблюдая положения планет в момент противостояния с истинным, а не средним (как предлагали Птолемей, Коперник и Браге) Солнцем. (В момент противостояния с Солнцем направления Земля — планета и Солнце — планета совпадают, что позволяет избавиться от второго неравенства, обусловленного различием в гео- и гелиоцентрической долготе.)

Этот тезис Кеплера послужил причиной его спора с Браге в первые же дни пребывания Кеплера в Бенатеке. Сам Кеплер так описывает дискуссию с Браге: «Прибыв к Браге, я тотчас же заметил, что он, вместе с Птолемеем и Коперником, определял первое неравенство по среднему движению Солнца. Но еще за четыре года до этого я, опираясь на физические соображения, пришел к заключению, что исходить следует (как показано в «Тайне мироздания») из истинного движения Солнца. Когда между нами возникло разногласие, Браге сослался на то, что ему и с помощью среднего движения Солнца удалось достичь хорошего согласия с наблюдениями при описании первого неравенства. Я же возразил ему, что указанное обстоятельство не мешает при описании первого неравенства использовать те же наблюдения, но отнесенные к истинному движению Солнца, ибо решить, кто из нас прав, сможет лишь второе неравенство».

Поскольку Браге и его ассистенту Лонгомонтанусу действительно удалось добиться удовлетворительного согласия с наблюдениями (в том, что касалось первого неравенства), Кеплеру необходимо было доказать, что переход к истинному Солнцу приводит лишь к незначительным изменениям полученных результатов. Проведенные им вычисления показали, что максимальное изменение гелиоцентрической долготы (вследствие малого эксцентриситета земной орбиты) составляет $5'$ и, следовательно, не приводит к противоречиям с наблюдениями. Все последующие вычисления в теории Марса Кеплер производил, основываясь на истинном движении Солнца.

Представление о Солнце как об источнике движения планет позволило Кеплеру ввести в теорию Коперника еще одно важное усовершенствование, которое на первый взгляд может показаться парадоксальным: Кеплер при объяснении первого неравенства отказался от введенного Коперником эпицикла и вновь вернулся к (почти) птолемеевскому эксцентру, т. е. сместил Солнце относительно центра орбиты планеты. И это после того, как Кеплер сам доказал приближенную эквивалентность обоих способов представления первого неравенства!

В действительности этот шаг Кеплера не был внутренне противоречив и не означал возврата к птолемеевским взглядам. Старую птолемеевскую картину движения Кеплер наполнил новым физическим содержанием: поместив Солнце вне центра круговой орбиты, он объяснил, что заставляет планеты то ускорять, то замедлять свое движение. Из двух математически эквивалентных средств описания первого неравенства Кеплер выбрал то, которое имело больший физический смысл.

Эксцентр Кеплера отличался от птолемеевского не только тем, что в центре Вселенной у Кеплера находилось истинное Солнце и определять круговую орбиту Марса надлежало по его противостояниям с истинным Солнцем. Кеплер отказался от гипотезы о том, что центр круговой орбиты O Марса делит пополам отрезок между положением Солнца S и центром

эксцента A (полный эксцентриситет). Отношение, в котором точка O делит отрезок AS , следовало теперь вычислять из наблюдений.

Гипотезу о круговой орбите также надлежало подтвердить, опираясь на наблюдения Браге. В распоряжении Кеплера имелась составленная Браге таблица десяти противостояний, озаглавленная «Точное описание движения планеты Марс по ее эксцентру на основе точных акронических наблюдений, проводившихся, как явствует из самой таблицы, с особой тщательностью в течение 20 лет (с 1580 по 1600 г.) с помощью наших инструментов для различных созвездий».

Использовать непосредственно данные Браге Кеплер не мог по двум причинам: во-первых, потому, что астрономы до Кеплера (в том числе Браге и Коперник) не умели правильно учитывать наклон плоскости орбиты Марса к плоскости эклиптики, так как считали, что этот угол осциллирует со временем; во-вторых, потому, что Браге все свои наблюдения и вычисления относил к среднему Солнцу и даты истинных противостояний и положения Марса необходимо было находить, интерполируя данные Браге. Особенно трудной была первая задача. Решая ее, Кеплер вновь продемонстрировал тонкость своей физической интуиции. Кеплеру предстояло не только решить трудную задачу, но и развеять миф о колебаниях плоскости орбиты Марса, передававшийся до него астрономами из поколения в поколение.

Мысли о колеблющейся без видимых причин плоскости орбиты Марса Кеплер-физик, в отличие от Коперника, решительно отвергал с самого начала. Необходимо было лишь подкрепить уверенность вычислениями на основе наблюдений Браге. Выбрав шесть наблюдений, Кеплер нашел долготу восходящего узла (она оказалась равной $46\frac{1}{3}^\circ$). Угол наклона плоскости орбиты Марса к плоскости эклиптики Кеплер вычислил тремя различными способами.

Проделанные выкладки позволили Кеплеру прийти «к совершенно достоверному заключению: угол наклона плоскости эксцента к плоскости эклиптики не меняется» и равен $1^\circ 50'$... «Почему бы нам не обобщить это заключение, — замечает Кеплер, — ведь никаких оснований, по которым оно должно быть справедливым лишь для одной планеты, нет? Впрочем, аналогичное заключение для Венеры и Меркурия я могу доказать и на основе наблюдений».

Доказав постоянство угла между плоскостью орбиты Марса и плоскостью эклиптики, Кеплер смог осуществить правильное приведение гелиоцентрических долгот к долготам в плоскости орбиты Марса. Оценив для большей точности вычислений суточный параллакс Марса и дополнив таблицу противостояний, составленную Браге, двумя собственными наблюдениями (1602 и 1604 гг.), Кеплер получил исходные данные для проверки своей гипотезы о круговой орбите Марса.

Находить положение линии апсид и эксцентриситет круговой орбиты астрономы умели со времен Птолемея. В предположении, что центр орбиты делит эксцентриситет пополам, для этого требовались три наблюдения. Решение достигалось простым (по крайней мере по современным масштабам) геометрическим построением. Кеплер, отказавшись от гипотезы о делении эксцентриситета центром орбиты в равном отношении, усложнил задачу. Для отыскания величины отношения требовалось дополнительное (четвертое) наблюдение. Метод решения, предложенный Кеплером, также полностью отличался от птолемеевского. Выбрав из 12 противостояний 4 (за 1587, 1591, 1593 и 1595 гг.), Кеплер дает геометрическое решение задачи определения гелиоцентрических координат.

Излагая ход своих рассуждений, Кеплер замечает: «Если ты, читатель, устал от этого утомительного метода, то тем больше причин у тебя посочувствовать мне, проделавшему все эти выкладки по крайней мере семьдесят раз и затратившему на них много времени. Думаю, ты не станешь удивляться, когда узнаешь, что пошел уже пятый год с тех пор, как я стал заниматься теорией Марса, хотя почти весь 1603 г. мне пришлось посвящать исследованиям по оптике».

Кеплер-математик, видевший в Евклидовых «Началах» идеал математической строгости, не был удовлетворен методом, поскольку тот не был «чисто геометрическим».

Кеплер-физик по праву гордился своим замечательным достижением и, обращаясь с вызовом к математикам, писал:

«Найдутся хитроумные геометры вроде Виеты, которые не преминут приписать себе в особую заслугу, если им удастся доказать, что мой метод недостаточно искусен. Аналогичный упрек по поводу других задач Виета бросил Птолемею, Копернику и Региомонтау. Что же, эти математики могут испытать свои силы и найти геометрическое решение задачи. Каждого из них я буду почитать за великого Аполлона. Мне же достаточно и того, что, исходя из одной посылки (четыре наблюдений и двух гипотез), могу построить четыре или пять заключений, т. е. найти выход из лабиринта не при свете факела, а с помощью простой нити (которая зато была у меня в руках с самого начала). Если понять метод трудно, то исследовать вещи без метода еще труднее».

Проделав огромное количество вычислений, Кеплер получил нужные ему данные об орбите Марса. Таким образом были найдены положение линии апсид и отношение, в котором центр орбиты делит полный эксцентриситет (расстояние между центром экванта и Солнцем). Проверив полученный результат на восьми оставшихся неиспользованными наблюдениях, Кеплер обращается к читателю:

«Ты видишь, прилежный читатель, что основанная на изложенном выше методе гипотеза не только воспроизводит при вычислениях те четыре наблюдения, которые были использованы при выводе, но и передает все остальные наблюдения с точностью до двух минут».

Казалось бы, желаемая цель достигнута, но более строгая проверка показывает иллюзорность достигнутого успеха, и торжество победителя сменяется горечью неудачи.

«Кто бы мог подумать, что такое возможно! — восклицает Кеплер. — Гипотеза, дававшая столь близкое согласие с акроническими наблюдениями, все же оказалась ошибочной, стоило лишь перейти к наблюдениям среднего или истинного Солнца. Птолемею предупреждал нас об этом, когда учил, что эксцентриситет экванта должен делиться пополам центром эксцентра, несущего на себе планету. Я же вместе с Тихо Браге не предполагал деления эксцентриситета в равном отношении. Правда, Коперник также не боялся время от времени оставлять без внимания деление эксцентриситета в равном отношении. Но Коперник использовал крайне малое число наблюдений, полагая, по-видимому, что и Птолемею использовал не больше наблюдений, чем упомянуто в его великом труде. Тихо Браге удалось продвинуться лишь немногим дальше».

Что же делать дальше? «...Мы предполагали, что орбита, по которой обращается планета, представляет собой идеальную окружность и, кроме того, что на линии апсид существует единственная точка, находящаяся на вполне определенном расстоянии от центра эксцентра [это и есть центр экванта], относительно которой Марс в равные промежутки времени описывает равные углы. Одно из этих двух предположений или оба ошибочны, скорее всего оба, ибо использованные мной наблюдения верны». Нельзя не преклониться перед беспощадной логикой Кеплера.

Кеплер предпринимает еще одну попытку спасти круговую орбиту Марса — с помощью старой гипотезы о том, что эксцентриситет эксцента равен половине полного эксцентриситета. Однако вычисленные положения Марса в восьми точках не совпали с наблюдениями, хотя расхождение и было незначительным: около $8'$. Обнаружив это, Кеплер пишет классическое рассуждение о точности теории и эксперимента.

«В столь малом отклонении — восьми минутах — и заключается причина, по которой Птолемей прибег к делению полного эксцентриситета в равном отношении, ибо ошибка от деления полного эксцентриситета пополам... составляет самое большее $8'$, причем для Марса, обладающего наибольшим эксцентриситетом. У других же планет ошибка еще меньше. Птолемей сам говорит, что точность его наблюдений нигде не превосходит $10'$, т. е. $1/6$ градуса. Таким образом, неточность, или, как еще говорят, допустимое отклонение при наблюдениях, превышает ошибку птолемеевских вычислений.

Нам же по милости божьей дарован столь добросовестный наблюдатель, как Тихо Браге. Его наблюдения выдали ошибку птолемеевских вычислений, дабы мы могли с благодарностью оценить это благодеяние и воспользоваться им, т. е., отправляясь от доказанной выше ошибочности принятых нами гипотез, взять на себя труд найти наконец истинную форму небесных движений. Этим путем я и хочу пойти, дабы подать пример другим. Если бы этими $8'$ можно было пренебречь, то сформулированную в главе 16 гипотезу о круговой орбите Марса я бы давно усовершенствовал, введя в нее деление полного эксцентриситета в равном отношении. Однако, поскольку указанной ошибкой пренебречь нельзя, эти $8'$ указывают путь к обновлению всей астрономии. Они послужили строительным материалом для большей части моей работы».

Итак, гипотеза о круговой орбите, несмотря на все ухищрения, оказалась несостоятельной, хотя и позволяла довольно точно вычислять гелиоцентрическую долготу Марса. «Таким образом,— заключает Кеплер,— здание, которое мы возвели на основе одних наблюдений Тихо, нам же пришлось и разрушить, руководствуясь другими наблюдениями того же мужа. Мы должны были понести это наказание за то, что, следуя своим предшественникам, приняли правдоподобные, но оказавшиеся в действительности ложными гипотезы».

Необходимо было искать новый подход к установлению формы орбиты Марса, и Кеплер сумел найти его, избрав окольный путь — через определение формы орбиты Земли. Очертания орбиты Земли Кеплер надеялся получить, выбрав на ней достаточно густую сеть точек и вычислив расстояния от них до Солнца. «Если таким способом удастся найти ключ,— писал Кеплер,— то путь для всего остального будет открыт».

И снова на первый план выступили физические идеи. Еще в главе 22 своей «Тайны мироздания», высказав возможные причины неравномерного движения планет, Кеплер особо оговорил, что его физические соображения, если они верны, в равной мере справедливы для всех планет, в том числе и для Земли. В докеплеровских теориях Земля и Солнце занимали «привилегированное» положение. Считалось, что они равномерно обращаются по так называемому простому эксцентру (т. е. по окружности), создавая лишь иллюзию замедления своего движения при приближении к перигелию и ускорения — при приближении к афелию. Другие же планеты, у которых эквант не совпадал с центром эксцента, должны были в действительности ускорять свой бег, приближаясь к Солнцу, и замедлять, удаляясь от Солнца.

У Кеплера, по его словам, «зародилось подозрение», что и Земля подобна остальным планетам.

Способ, которым Кеплер опроверг мнение авторитетов и доказал существование эксцентриситета экванта и для орбиты Земли, необычайно остроумен. Пользуясь современной терминологией, можно сказать, что

для вычисления расстояния Земля — Солнце Кеплер воспользовался методом триангуляции. Стоявшую перед ним задачу Кеплер сформулировал следующим образом:

«Я намереваюсь найти три или большее число наблюдений Марса, в которых планета находится в одной и той же точке эксцента, и тригонометрическим способом вычислить расстояния от этих точек эпицикла или орбиты до экванта. Поскольку окружность определяется тремя точками, я по трем наблюдениям определяю положение окружности и ее линии апсид, а также вычислю эксцентриситет экванта. Если же найдется еще и четвертое наблюдение, то его можно будет использовать для проверки».

Выбрав из наблюдений Браге положения Марса, отличающиеся на целое число сидерических периодов (сидерический период Марса, равный 687 дням, был хорошо известен), Кеплер получил базис триангуляции — отрезок SM , где S — истинное Солнце, а M — точка, в которую возвращается Марс после целого числа оборотов. Углы, под которыми отрезок SM виден с Земли, известны из наблюдений. Углы при вершине S (от Солнца) можно было вычислить с помощью разработанной Браге теории Солнца. Из треугольников Марс — Земля — Солнце Кеплер нашел расстояние Солнце — Земля в единицах Солнце — Марс, после чего для него уже не составило труда вычислить радиус окружности — орбиты Земли, направление линии апсид и, наконец, достичь цели всего предприятия — определить расстояния от центра экванта и Солнца до центра орбиты Земли. Оба расстояния оказались одинаковыми и составляли 0,018 радиуса земной орбиты. Таким образом, идея Кеплера о «равноправии» Земли с другими планетами (точнее, о невыделенности Земли среди остальных планет) подтвердилась.

Полученный результат, однако, был слишком важен, чтобы судить о его правильности можно было без строгой проверки, на основании только одного доказательства. Кеплер проверяет его разными способами.

Лишь после этого Кеплер счел полученный результат надежно обоснованным и, используя его для составления обширной таблицы расстояний от Земли до Солнца (с шагом в 1°), обратился к своей излюбленной теме — рассуждениям о физических причинах движения планет.

Именно теперь, когда одна из его догадок (о «равноправии» Земли с другими планетами), в конечном счете также основанная на физических соображениях, получила столь блестящее подтверждение, Кеплер возвращается к уже давно вынашиваемой им идее о связи между расстоянием от планеты до Солнца и скоростью планеты и развивает свои представления о силах, вынуждающих планеты обращаться вокруг Солнца.

Сначала он обнаруживает, что в окрестности апсид время, за которое планета проходит дугу, пропорционально длине радиуса-вектора, проведенного из Солнца, и переносит эту закономерность на остальные участки орбиты. Разумеется, от столь внимательного к наблюдениям теоретика, как Кеплер, не ускользает то обстоятельство, что вне афелия и перигелия подмеченное им соотношение выполняется лишь приближенно. Отправляясь от установленной на основе наблюдений частной закономерности, Кеплер приходит к выводу, что «сила, движущая планеты, сосредоточена в Солнце». Ход рассуждений Кеплера сводится к следующему:

«В предыдущей главе было доказано, что время, необходимое планете, чтобы пройти равные доли эксцента (или равные отрезки пути в небесном пространстве), пропорционально расстоянию от этих отрезков до точки, от которой отсчитывается эксцентриситет, или, проще говоря, что планета, обращаясь вокруг точки, скрытой за центром Вселенной, тем в меньшей степени подвергается действию силы, чем более

она удаляется от этой точки. Отсюда с необходимостью следует, что причина подобного ослабления кроется либо в самом теле планеты и обитающей в нем движущей силе, либо в точке, принятой за центр Вселенной.

Общепринятая аксиома всей натурфилософии гласит, что если какие-нибудь явления происходят одновременно, одинаковым образом и всегда протекают в одном и том же масштабе, то либо одно из них является причиной другого, либо оба обусловлены действием общей причины. В нашем случае ускорение и замедление движения всегда совпадают с пропорциональным им приближением планеты к центру Вселенной и удалением от него. Отсюда я заключаю, что либо замедление движения является причиной удаления светил от центра Вселенной, либо, наоборот, удаление обуславливает замедление движения, либо оба явления имеют одну общую причину».

Добросовестно рассмотрев все три возможности, Кеплер приходит к выводу, что в действительности осуществляется лишь вторая из них. «Таким образом, — подводит он итог своим рассуждениям, — остается лишь предположение, согласно которому причина замедления и ускорения движения кроется... в точке, принятой за центр Вселенной...

Следовательно, поскольку при увеличении расстояния от центра Вселенной до планеты движение планеты замедляется, а при уменьшении ускоряется, источник движущей силы с необходимостью должен лежать в точке, которую мы приняли за центр Вселенной. Если принять такую гипотезу, то становится ясной причина наблюдаемого явления: из гипотезы следует, что движение планет подчиняется правилу рычага. Действительно, движущаяся под действием исходящей из центра силы планета будет тем тяжелее (а потому и двигаться медленнее), чем меньше расстояние от нее до центра. То же самое происходит, когда я говорю, что груз тем тяжелее, чем дальше он отстоит от точки опоры, не сам по себе, а благодаря действию рычага, которое пропорционально длине плеча. В обоих случаях (здесь — рычага с грузом, там — движения планет) сила убывает обратно пропорционально расстоянию.

...А поскольку Солнце расположено в центре планетной системы, то из доказанного следует, что источник движущей силы находится в Солнце, ибо он должен находиться именно в центре Вселенной».

Представление о Солнце как источнике движения уточняется и дополняется. В свойствах исходящей от Солнца силы Кеплер усматривает теснейшую аналогию со свойствами света и с ее помощью еще раз обосновывает выведенный ранее из общих соображений закон убывания силы с расстоянием. Носителями силы, по мнению Кеплера, являются особые нематериальные частицы, испускаемые Солнцем. Чтобы планеты могли двигаться по окружностям, эти частицы, сообщаящие им движение, сами должны двигаться по окружностям. Следовательно, заключает Кеплер, и Солнце, источник движения, должно вращаться вокруг своей оси. Природу Солнца он поясняет с помощью аналогии, сравнивая его с магнитом.

Итог своим размышлениям о природе сил, действующих на планеты и обуславливающих их движение, Кеплер формулирует в виде следующих шести «совершенно правильных» аксиом:

«1. Тело планеты по своей природе склонно находиться в состоянии покоя там, где его можно считать изолированным от других тел.

2. Исходящая от Солнца сила перемещает тело планеты с одного места зодиака в другое.

3. Если бы расстояние от планеты до Солнца оставалось неизменным, то планета обращалась бы по окружности.

4. Если бы какая-нибудь планета совершала один за другим два полных оборота на различных расстояниях от Солнца, то периоды обращения относились бы между собой, как квадраты расстояний или длин окружностей.

5. Силы, скрывающейся в самой планете, недостаточно для того, чтобы планета могла перемещаться с места на место, ибо у нее нет ни ног, ни крыльев, ни плавников, которыми она могла бы опираться о небесный эфир.

6. Тем не менее изменение расстояния от планеты до Солнца обусловлено силой, присущей самой планете».

Наконец, настает момент «перевести эти умозрительные заключения на язык чисел». Здесь Кеплер и совершает одно из открытий, обессмертивших его имя: он формулирует так называемый второй закон движения планет,носящий ныне его имя (хронологически второй закон был открыт раньше первого).

Путь к открытию вновь (в который раз!) лежал через утомительные вычисления.

«Поскольку промежутки времени, которые требуются планете, чтобы проходить равные части эксцента, относятся друг к другу, как расстояния от этих частей до центра Вселенной, а расстояния эти меняются от одной точки полуокружности к другой, мне стоило немалых трудов найти, каким способом можно получить сумму отдельных расстояний. Действительно, без знания суммы всех расстояний (а их бесконечно много) нельзя указать промежутков времени, соответствующий тому или иному расстоянию, ибо любая часть суммы относится к отвечающему ей промежутку времени так же, как вся сумма ко всему периоду обращения.

Поэтому я начал с того, что разделил весь эксцентр на 360 частей (считая их как бы мельчайшими), и предположил, что в пределах каждой такой части расстояние до центра Вселенной не меняется».

Таблица расстояний была заготовлена заранее. Оставалось лишь просуммировать их.

«Затем, — продолжает Кеплер, — я взял период обращения, равный 365 дням 6 часам, округлил его и решил, что он должен соответствовать 360° , или полной окружности, означающей у астрономов среднюю аномалию. Отношение суммы расстояний к сумме времен я положил равным отношению любого отдельно взятого расстояния к соответствующему ему времени. Наконец, я сложил все полученные результаты, проделав все вычисления для каждого градуса».

Производить такие вычисления было чрезвычайно трудно, и Кеплер, по его собственному признанию, «стал искать способ облегчить вычисления».

«Поскольку я знал, что эксцентр состоит из бесконечно большого числа точек, которым отвечает бесконечно много расстояний, — говорит Кеплер, — мне пришло в голову, что все эти расстояния содержатся в площади эксцента. Я вспомнил, что некогда Архимед точно таким же образом разбил круг на бесконечно много треугольников, стремясь найти отношение длины окружности к диаметру. Именно в этом и состоит сокровенный смысл предложенного Архимедом косвенного доказательства. Вместо того чтобы разбивать, как прежде, окружность на 360 частей, я разбил на столько же частей площадь эксцентрического круга, проведя лучи из точки, от которой отсчитывается эксцентриситет...» После этого оставалось только предположить, что площадь — сумма радиусов-векторов — пропорциональна времени.

Свои исследования второго неравенства Кеплер заканчивает словами:

«Таким образом, я с помощью вполне надежных наблюдений и доказательств точно описал причину и меру второго неравенства, заставляю-

щего планеты на наших глазах останавливаться, поворачивать вспять или продолжать движение. Я показал, что второе неравенство сказывается и на первом и что теория Солнца или Земли (по Копернику), или эпицикла (по Птолемею) во всем подобна теории других планет. Я нашел также физическую причину первого неравенства и использовал ее при вычислении орбиты Солнца».

Уточнив орбиту Земли, Кеплер смог снова вернуться к своей главной задаче — определению формы орбиты Марса.

Выбрав несколько групп наблюдений (по три наблюдения в группе), Кеплер для каждой из них вычислил параметры орбиты Марса — положение линии апсид и величину эксцентриситета — в предположении, что орбита имеет форму окружности. Разброс полученных значений намного превосходил как погрешность наблюдений, так и ошибку вычислений. «Сколь ошибочны все эти результаты, — заключает Кеплер, — видно из того, что каждый раз получается нечто иное».

Обратившись к наблюдениям, Кеплер сравнивает их с расстояниями от Марса до Солнца, вычисленными по гипотезе о круговой орбите, и приходит к следующим результатам:

Дата наблюдения	Угловое расстояние от афелия	Расстояние, вычисленное по гипотезе о круговой орбите	Расстояние из наблюдений	Разность
31 октября 1590 г.	9°37'	1,66605	1,66255	0,00350
31 декабря 1590 г.	36°43'	1,63883	1,63100	0,00783
25 октября 1595 г.	104°25'	1,48539	1,47750	0,00789

Отсюда Кеплер делает вывод: «Орбита планеты Марс не имеет формы окружности. С двух сторон орбита постепенно отклоняется внутрь, а затем вновь возвращается к окружности в перигелии. Такую форму орбиты принято называть овалом». Затем овал сменяет яйцевидная орбита с тупым концом, обращенным к афелию, и острым — к перигелию (в афелии и перигелии яйцевидный овал касается окружности).

Отклонение орбиты от окружности Кеплер не только пытается доказать эмпирически, ссылаясь на наблюдения Браге, но и обосновать, исходя из развитых им «физических» представлений о двух силах, действующих на планету, одна из которых (исходящая от Солнца) заставляет планету равномерно обращаться вокруг Солнца, а другая (таящаяся в самой планете) вынуждает планету равномерно двигаться по небольшому эпициклу и тем самым вызывает периодические изменения расстояния от планеты до Солнца. Однако все эти рассуждения оказались ошибочными, и первым, кто признал это, был сам Кеплер:

«Как только из надежных наблюдений Браге стало ясно, что орбита планеты не является точной окружностью, а сплющена с двух сторон, мне показалось, что я знаю естественную причину такого явления. Ведь подобные вопросы я чрезвычайно подробно исследовал еще в главе 30. Мне захотелось было попросить читателя, чтобы он, прежде чем идти дальше, еще раз внимательно перечитал всю эту главу. Действительно, в ней я приписал причину возникновения эксцентриситета некоторой силе, скрывающейся в самой планете, из чего следовало, что и причину отклонения планеты от эксцентрического круга я приписал той же силе.

Однако то, что случилось со мной, как нельзя лучше соответствует поговорке «Поспешишь — людей насмешишь».

То, что вначале казалось достаточно убедительными доводами, оказалось не более чем правдоподобными соображениями. Наблюдения разбили все хитроумные построения. Начинать нужно было с того места, которого удалось достичь до обращения к «физике», — с определения формы орбиты по точкам. Хотя каждый шаг давался ценой огромных вычислительных трудностей, Кеплер не пал духом. Более того, он еще имел силы проинизировать над своей (правда, временной) неудачей:

«В то время, как я упивался триумфом, одержанным над движениями Марса, словно тот уже был окончательно побежден, заключен в темницу таблиц и оплетен путами уравнения эксцентра, из разных мест стали приходить сообщения о том, что победа была лишь призрачной и война разгорелась с новой силой. В стенах моего дома враг, которого я уже считал пленником, разорвал путы уравнений и взломал темницу таблиц, ибо ни один из геометрических методов... не мог по точности сравниться с временной гипотезой *) (которая приводит к верным уравнениям, хотя и основана на неверных предположениях). Снаружи шпионы, расставленные вдоль всей орбиты (я имею в виду истинные расстояния), одолели вызванные мной в главе 45 войска физических причин, сбросили их гнет и вновь обрели свободу. Еще немного, и бежавший враг примкнул бы к восставшим, что привело бы меня в отчаяние. Не теряя ни минуты, я тайно выслал вперед подкрепление — полки новых физических причин, со всей поспешностью разведал, в каком направлении скрылся беглец, и стал преследовать его по пятам».

Итак, «физические причины», по которым орбита Марса должна была быть овалом, по выражению Кеплера, «обратились в дым». Но знало ли это, что из гипотезы об овальной форме орбиты Марса не удалось извлечь никаких сведений об истинной форме орбиты? Нет. Сравнивая расстояния, вычисленные с помощью временной гипотезы, с расстояниями, вычисленными по гипотезе об овальной орбите, Кеплер убеждается в том, что вдаль от афелия и перигелия первые неизменно оказываются длиннее, а вторые — короче расстояний, полученных из наблюдений. Отсюда он делает вывод: «Истина лежит посередине».

Внимание Кеплера привлекают луночки между окружностью и овалом. Приняв радиус окружности за 1, он находит, что ширина луночек составляет 0,00429. Это число не выходит у Кеплера из головы. Вновь и вновь возвращается он к мысли о том, что «в главе 45, по сути дела, ничего не сказано и что именно поэтому триумф над Марсом оказался химерой». Решение приходит, как всегда, неожиданно. Кеплер вычисляет угол (назовем его α), под которым наблюдатель, находящийся на Марсе, видит отрезок от центра орбиты до положения Солнца. Чтобы понять дальнейшие поиски, посмотрим на эллипс. Отрезок, о котором идет речь, — это расстояние от его центра до фокуса. Ширина луночки — это разность между большой полуосью a и малой b (выраженная в долях большой полуоси), так что $(a - b)/a = 0,00429$. Все, что надо нам еще знать, это то, что расстояние от фокуса до конца малой полуоси равно также a . Кеплер обращает внимание на странный для него факт, что, когда угол α максимальный, его косеканс равен 1,00429, отличаясь точно на единицу от вычисленной ранее ширины луночки. Мы-то знаем, что косеканс этот равен отношению расстояния до планеты, когда она нахо-

*) Временной Кеплер называет гипотезу о круговой орбите Марса.

дится на конце малой полуоси (когда α максимален), к длине малой полуоси:

$$\operatorname{cosec} \alpha = \frac{a}{b} = \frac{a}{a-(a-b)} \approx 1 + \frac{a-b}{a}.$$

Именно это и обнаруживает Кеплер. Совпадение приводит его в изумление. Можно только удивляться, каким чутьем естествоиспытателя надо обладать, чтобы почувствовать за этим численным курьезом глубокий закон. Для Кеплера никакое совпадение не случайно. Анализируя соотношение между углом и расстоянием для других положений, он приходит к уравнению эллипса в форме, которая до сих пор носит название уравнения эллипса ($a = 1$):

$$r = 1 + e \cos \beta.$$

В этом уравнении β — эксцентрическая аномалия, т. е. угол между радиусом-вектором, проведенным из центра эллипса, и большой осью, а e — эксцентриситет. В результате Кеплер нашел достаточные основания для окончательного отказа от круговых движений планет и для утверждения нового закона.

Но можно ли считать результат обоснованным, если он не подкреплён физическими соображениями? Разумеется, нет. И Кеплер вновь пускается в сложные рассуждения, чтобы с их помощью доказать необходимость полученного результата. До конца великого плаванья к берегам «Новой астрономии» оставалось совсем немного, но и последний этап пути достался нелегко.

«Чем ближе подходишь к Природе, — размышляет Кеплер, — тем больше она резвится и строит проказ над тем, кто хочет ее поймать, дабы ускользнуть от него в тот момент, когда она уже почти поймана». Но желанный берег был уже близко. Еще одно усилие, и перед Кеплером открывается истина: «Для орбиты планеты не остается никакой другой формы, кроме идеального эллипса, ибо выведенные из физических принципов причины согласуются с ...результатами наблюдений и временной гипотезой». Так был открыт первый закон Кеплера.

Проверкой новой теории — вычислением координат Марса, не подававшихся усилиям предшественников Кеплера, завершается «Новая астрономия», которую он назвал «Физикой неба». Поиски гармонии приносят Кеплеру богатые находки и уверенность в том, что именно ему суждено понять до конца скрытую от всех механику планет. Иступленно работая над теорией Марса, заполняя сотни страниц вычислениями (повторяя их по 70 раз!), он не забыл о своем намерении написать грандиозный труд «De Harmonice Mundi», план которого он изложил в письме к Херварту фон Хоэнбургу еще в 1599 г.

Работа над «Физикой неба» требовала не только терпения, но и новых идей; она стоила Кеплеру колоссального напряжения сил, и у него просто не оставалось времени, чтобы заняться новой глубоко волновавшей его темой; однако размышления над ней не прекращались. О том, насколько неотступно преследовала Кеплера мысль о поисках гармонии мира, свидетельствует хотя бы признание, вырвавшееся у победителя Марса в письме к англичанину Гейдону (1605 г.): «Если бы господь избавил меня от астрономии, дабы я мог сосредоточить все свои помыслы на работе «О гармонии мира!»».

«Гармония мира» была закончена лишь 27 мая 1618 г. (правда, последняя — пятая — книга великого труда подверглась существенной

переработке во время печатания, и ее окончательный вариант был завершён 19 февраля 1619 г.).

Если в «Тайне мироздания» мы ощущаем романтический порыв и юношескую увлеченность автора, а в «Новой астрономии» изумляемся тонкой интуицией автора, позволяющей ему находить верную дорогу сквозь лабиринт наблюдений, то в «Гармонии мира» перед нами предстает Кеплер-философ, занятый поисками ключа к строению Вселенной, сверх-принципа, позволяющего единым взглядом охватить все богатство явлений, обосновать общность всех членов солнечной системы.

Но именно в этой книге проявилась слабость метода Кеплера. Сейчас мы ясно видим, что одних численных закономерностей, так сказать, арифметики гармонии, недостаточно для построения динамики движения планет. Для этого необходимо было иметь уравнения Ньютона. Кеплер, конечно, этого не знал. Он видел, что надо найти гармонию не только в геометрических свойствах системы планет, но и в законах их движения. Фантазия автора по-прежнему неудержима. Преодолевая математические трудности *), он стремится решить великую задачу, к решению которой он был предназначен судьбой.

Книга полна идей и фантазий; однако нам сейчас очень трудно следить за ходом мыслей автора: мы сейчас знаем, что его путь был обречен на неудачу с самого начала, и мы заранее с подозрением относимся к тем находкам, которые ему казались драгоценными. Но среди этих находок оказался и третий закон Кеплера, ценность которого сомнений не вызывает. Здесь мы не будем подробно излагать все, о чем написано в этой книге. Почти все не имеет отношения к третьему закону. Мы быстро «пройдемся» по книге, отмечая лишь некоторые ее достопримечательности.

Высокая задача требовала особого характера изложения. Поскольку речь шла о раскрытии сокровеннейших планов, заложенных при сотворении мира, все выводы должны были быть логически безупречными. Поэтому Кеплер решает следовать манере изложения Евклида, в «Началах» которого математики на протяжении многих веков видели идеал математической строгости.

Для Кеплера, видевшего в геометрии «прообраз красоты мира», естественно было искать причины гармонии не в числовых соотношениях, как это делали пифагорейцы, а рассматривать свойства чисел лишь как отражение свойств стоящих за ними геометрических фигур. Основная идея всего труда — универсальный характер гармонии мира, и роль математики в познании этой гармонии отчетливо сформулирована в эпиграфе из любимого Кеплером античного автора Прокла Диадокха, предпосланном первой книге:

«В изучение природы математика вносит величайший вклад тем, что позволяет обнаружить стройную систему идей, в соответствии с которыми построена Вселенная, ...и представить простые элементы, на которых зиждутся небеса, принимающие в различных частях соответствующие формы, во всем их гармоничном и соразмерном единстве».

В своих исследованиях гармонических пропорций Кеплер во многом использовал X книгу «Начал» Евклида, дополнив евклидовскую теорию иррациональных чисел их классификацией по степени «представимости». (Любопытно заметить, что самый термин «иррацио-

*) Мы не сказали, что Кеплер был фактически первым, кто эффективно использовал логарифмы в своих вычислениях. Составленные им логарифмические таблицы были в ходу еще в XVIII веке.

нальный» Кеплер считал неверным и заменял его термином «невывразимый» *).)

О своем отношении к Евклиду Кеплер подробно рассказывает во введении к книге I «Гармонии мира»:

«Когда я увидел, что истинные и подлинные различия между геометрическими фигурами, из которых я намеревался вывести причины гармонических пропорций, обычно совершенно неизвестны, что Евклид, подвергший их исследованию, смятен и подавлен злобной критикой Рамуса **), заглушен криками высокомерных невежд и либо его никто не слушает, либо он говорит о тайнах философии глухим, что Прокл, открывший для понимания Евклида, извлекая скрытое на свет и сумевший сделать легко понятными самые трудные места, служит предметом насмешек, а его комментарий простирается не далее десятой книги, мне стало ясно, что делать. Свою задачу я усмотрел в том, чтобы прежде всего выписать из X книги Евклида то, что особенно важно для задуманного мной плана; затем с помощью некоторой классификации расположить в четком порядке идеи Евклида, указать причины, по которым Евклид пренебрег тем или иным членом этой последовательности, и, наконец, рассмотреть сами фигуры. Поскольку при этом речь шла о вполне ясном изложении Евклида, я довольствовался лишь тем, что приводил формулировки соответствующих теорем. Многое из того, что Евклид доказывал иначе, мне пришлось изложить заново, поскольку я преследовал вполне определенную цель — сравнить представимые и непредставимые фигуры. Я соединял разрозненное и изменял порядок. Для удобства ссылок я ввел сквозную нумерацию определений, предложений и теорем, как в «Диоптрике» ***). Я не стремился к особой точности в леммах и не слишком заботился о выражениях, ибо в большей мере заботился о самом предмете, выступая не как математик в философии, а как философ в этой части математики».

Дальше идет разбор свойств геометрических фигур, причем важнейшим их свойством объявляется рациональность отношений длин их элементов и возможность построения их с помощью циркуля и линейки. Это свойство кладется в основу разделения многоугольников на представимые и непредставимые. Кеплер говорит, что «речь идет здесь об очень важных вещах, ибо в этом и состоит причина, по которой бог не использовал семиугольник и другие фигуры этого же рода для украшения мира в отличие от ранее „введенных представимых фигур“».

Однако «представимых» фигур оказалось бесконечно много, и выбрать среди них конечное число фигур, с помощью которых можно было бы «обосновать» гармонические пропорции, было невозможно.

Убедившись в этом, Кеплер пытается различать фигуры по новому свойству, названному им конгруэнцией. Вторая книга «Гармонии мира» так и называется — «Конгруэнция гармонических фигур». Конгруэнцией Кеплер называет заполнение плоскости геометрическими фигурами или построение из плоских фигур многогранников.

*) «Переводчики на латынь передают этот термин словом «иррациональный», т. е. употребляют выражение, таящее в себе опасность неоднозначности и бессмыслицы. Мы хотим положить конец употреблению термина «иррациональный», ибо имеется много отрезков, в существовании которых нас убеждают самые веские основания, хотя эти отрезки и невыразимы».

**) Питер Рамус (Пьер де ла Раме) (1515—1570) — математик, погиб в Варфоломеевскую ночь.

***) Книга «Диоптрика» была написана Кеплером во время работы над «Новой астрономией».

Рассматривая плоские конгруэнции, Кеплер одним из первых решает задачу о паркетах — сплошном (без просветов и перекрытий) заполнении плоскости фигурами, как одинаковыми, так и различных форм и размеров.

Но главное математическое открытие Кеплер совершает при рассмотрении пространственных конфигураций. Если допустить, чтобы грани правильного многогранника пересекали друг друга, то к пяти правильным платоновым многогранникам добавляется еще шесть, имеющих форму звезд. Два из них и открыты Кеплером; за ними до сих пор сохранилось название кеплеровых. Современники не оценили это открытие. Оно было забыто и повторно совершено лишь в начале прошлого века французским математиком Пуансо.

Число конгруэнтных фигур оказалось конечным, и все они относились к классу представимых фигур. Это показалось добрым предзнаменованием.

Теперь Кеплеру предстояло извлечь из свойственных этим фигурам числовых отношений такие, которые можно было бы принять за основу гармонии. Сначала Кеплер занимается музыкой; к планетам он переходит позже. Но ему уже ясно, что изучение периодов обращения планет есть область, к которой он должен приложить создаваемую им теорию.

Поискам гармонических соотношений посвящена книга III «Гармонии мира», которая называется «Происхождение гармонических пропорций, а также природа и различие музыкальных интервалов». В предисловии к книге Кеплер рассказывает предание, приписывающее открытие гармонических отношений Пифагору: «Говорят, что Пифагор, проходя как-то раз мимо кузницы и услышав гармоничные звуки, издаваемые молотами, впервые открыл, что различие в тоне связано с размерами молота: большие молоты издают низкий звук, маленькие — высокий. Поскольку то, что называется пропорцией, связано с числовыми величинами, он измерил молоты и без труда нашел пропорции, отвечающие гармоничным или диссонансным, мелодичным или немелодичным звуковым интервалам. От молотов Пифагор перешел к длинам струн, для которых слух более точно указывает, какая их часть задает консонанс и какая — диссонанс».

Попытки построить весь звукоряд из каких-то основных интервалов предпринимались и до Кеплера. Так, Платон в «Тимее» произвольно принял за исходные три интервала: октаву, квинту и кварту. Кеплеру же с его установкой о первичности геометрических фигур предстояло решить более сложную задачу: не только указать конечный набор интервалов, с помощью которых можно построить все остальные консонансы, но и вывести основные интервалы из свойств геометрических фигур.

Проделав вычислительную работу, сравнимую по объему с эмпирическим определением орбиты Марса или Земли по точкам, перебрав множество вариантов, Кеплер (в середине августа 1599 г.) получает семь основных гармонических интервалов (консонансов): октаву (с отношением частот $1 : 2$), увеличенную сексту ($3 : 5$), малую сексту ($5 : 8$), чистую квинту ($2 : 3$), чистую кварту ($3 : 4$), большую терцию ($4 : 5$) и малую терцию ($5 : 6$) — и выводит из них весь звукоряд, мажорное и минорное наклонения и т. п.

«Эти семь делений струны, — поясняет Кеплер, я нашел сначала, руководствуясь слухом, в числе, равном числу гармоний в пределах одной октавы, и лишь затем не без труда вывел причины отдельных делений и всей их совокупности из глубочайших оснований геометрии».

Музыкальная гармония дала Кеплеру удобную терминологию. Однако сколь ни важны музыкальные гармонические интервалы, они представляют собой не более чем конкретную реализацию абстрактных отношений, которые и являются гармоническими в подлинном смысле. Носителем таких «чистых» гармоний служит идеальная окружность и ее разбиения. В главе I «О сущности чувственных, а также доступных лишь духу гармонических пропорций» Кеплер подробно излагает свое понимание гармонии:

«Необходимо отличать чувственные и аналогичные им гармонии от чистых гармоний, лишенных всего чувственного. Первые многочисленны... и имеют разнообразных носителей. Чистые же гармонии, лишенные чувственных носителей, всегда одинаковы. Например, тот тип гармонии, который возникает из двойной пропорции, всегда один и тот же. Если он выражен в звуках, то называется октавой, если в углах между лучами, то противостоянием. При этом в музыкальной системе октава может быть высокой или низкой,... гармонией человеческих голосов или звуков, издаваемых музыкальными инструментами. Столь же многообразны проявления этой гармонии в метеорологии; октава может быть противостоянием Сатурна и Юпитера или какой-нибудь другой пары планет, наблюдаться между знаками зодиака вблизи точек равноденствия или между знаками зодиака вблизи солнцестояний».

Другой реализацией гармоний служат так называемые конфигурации, которые Кеплер определяет следующим образом:

«Определение I. Слово «конфигурация» означает угол, под которым приходят на Землю (рассматриваемую как точка) лучи от каких-нибудь двух планет, или, что то же, дугу большого круга, проходящего по зодиаку которая служит мерой названного угла...

Определение II. Действенной называется конфигурация в том случае, если угол между лучами, исходящими от двух планет, обладает особым свойством возбуждать одушевленные существа в силу их подлунной природы и ограниченных возможностей так, что во время такой конфигурации эти существа развивают повышенную активность».

Углы между лучами («аспекты»), приходящими на Землю от светил, по мнению Кеплера, влияют на погоду. Чтобы воспринимать аспекты, Земля должна быть одушевленным существом, и т. д.

Мы не будем останавливаться на астрологических воззрениях Кеплера и ограничимся лишь тем, что приведем список «действенных аспектов». Их у Кеплера восемь: соединение (1 : 1), секстиль (1 : 6) квадратура (1 : 4), тригон (1 : 3), противостояние (1 : 2), квинтиль (1 : 5), триоктиль (3 : 8) и биквинтиль (2 : 5). Главная реализация гармоний — в небесных движениях; ей посвящена последняя, пятая, книга «Гармонии мира» под названием «Совершеннейшая гармония в небесных движениях и связанное с ней возникновение эксцентриситетов, радиусов орбит и периодов обращения».

Неподеленная радость человека, благополучно завершившего дело всей своей жизни, достигшего желанной цели, к которой он стремился долгие годы, звучит в ярком, темпераментном, чисто «кеплеровском» предисловии:

«То, о чем я догадывался 25 лет назад еще до открытия пяти правильных тел между небесными орбитами, то, в чем я был уверен еще до прочтения рукописи Птолемея о гармонии, то, что я обещал своим друзьям, выбрав заглавие этой книги еще до того, как сам предмет стал мне ясен, то, что 16 лет назад я провозгласил как цель исследования в одной из

своих работ *), то, что побудило меня посвятить лучшую часть жизни астрономическим изысканиям, найти Тихо Браге и избрать Прагу местом жительства, ...я, наконец, вынес на суд.

...Ныне, после того, как 18 месяцев назад впервые забрезжил рассвет, после того, как три месяца назад наступил ясный день и лишь несколько дней назад взошло яркое солнце чудеснейшего зрелища, ничто не может остановить меня. Я отдаюсь священному экстазу. Не боясь насмешек смертных, я исповедуюсь открыто. Да, я похитил золотые сосуды египтян, дабы вдали от границ Египта сделать жертвенник своему богу. Если вы простите меня, я буду рад. Если вы осудите меня, я снесу это. Жребий брошен. Я написал книгу либо для современников, либо для потомков; мне безразлично — для кого. Пусть книга ждет сотни лет своего читателя: ждал же сам бог 6000 лет, пока явился свидетель».

Две основные идеи лежат в основе кеплеровской схемы строения мира, два принципа: геометрический (число планет и расстояния между ними определяются пятью правильными платоновскими телами) и гармонический, управляющий эксцентриситетами и периодами обращения. Геометрический принцип подробно изложен в «Тайне мироздания», и первая глава астрономической (пятой) книги «Гармонии мира» следует в основном юношеской работе Кеплера. Правда, говоря о семействе правильных тел, Кеплер упоминает и о своем новом открытии, неизвестном до него звездчатом многограннике («... Это семейство содержит также пространственную звезду, которая получается, если грани додекаэдра продолжить до пересечения в одной точке»), но принципиальных изменений нет.

Глава вторая «О связи гармонических пропорций с пятью правильными телами», по замыслу Кеплера, призвана показать, что оба принципа не исключают, а скорее дополняют друг друга. В ней, в частности, говорится следующее:

«...Связь эта весьма разнообразна, однако в основном бывает четырех типов. Ее можно усматривать либо во внешних формах правильных тел, либо в пропорциях, возникающих при построении их граней, которые также гармоничны, либо в пропорциях уже построенных тел, рассматриваемых как порознь, так и вместе, либо, наконец, в пропорциях, которые точно или приближенно совпадают с пропорциями вписанных и описанных вокруг правильных тел сфер».

Однако, хотя сами гармонические пропорции уже были найдены, их носитель в небесных движениях оставался по-прежнему неизвестным. Прежде чем пускаться на поиски таинственного носителя небесных гармоний, Кеплер считает необходимым напомнить читателю «основные сведения, необходимые при рассмотрении небесных гармоний», в 13 тезисах изложить состояние современной ему астрономической науки и подготовить почву для последующих исследований. Открывается этот удивительный очерк изложением идей Коперника и Браге. «Прежде всего, читателю следует знать, что старые астрономические гипотезы Птолемея в том виде, как они изложены в «Theoriae» [«Теории»] Пуэрбаха и в учебниках других авторов, полностью исключаются из нашего рассмотрения и не будут приниматься во внимание, ибо они неправильно передают и расположение небесных тел, и их движения».

Место старых гипотез может занять лишь учение Коперника о строении Вселенной, в правильности которого я хотел бы, если это возможно, убедить всех людей. К сожалению, большинство людей, когда речь захо-

*) Имсеется в виду работа Кеплера «Тайна мироздания».

дит об исследовании Вселенной, усматривают в этом нечто новое. Для их слуха звучит совершенно непривычно, что Земля должна быть одной из планет и, подобно другим светилам, обращаться вокруг Солнца. Поэтому все, для кого новизна учения Коперника является камнем преткновения, должны знать, что проводимые далее гармонические рассуждения справедливы и для гипотез Тихо Браге. В самом деле, этот мастер не расходится с Коперником в том, что касается расположения небесных тел и объяснения их движения. Лишь коперниковское годовое движение Земли он относит ко всей системе планетных орбит и к Солнцу, которое, по единодушному мнению обоих мастеров, является центром всей системы».

После вводных замечаний (о том, что «все планеты, кроме Луны, обращаются вокруг Солнца» и что расстояния от планет до Солнца не остаются неизменными и т. д.) Кеплер в пятом тезисе подводит итог своим изысканиям по теории Марса *):

«В-пятых, дабы получить движения, между которыми возникают гармонии, я хотел бы особо обратить внимание читателя на то, что мне удалось установить в «Новой астрономии» на основе чрезвычайно надежных наблюдений Тихо Браге. Равные дуги одного и того же эксцента, соответствующие промежутку времени, например, в одни сутки, планета проходит не с одинаковой скоростью. Различные по величине промежутки времени, отвечающие равным дугам эксцента, пропорциональны расстояниям до Солнца, источника движения. Наоборот, если взять равные промежутки времени..., то соответствующие истинные дуги эксцентрической орбиты обратно пропорциональны расстоянию от дуги до Солнца. Далее я доказал, что орбита планеты имеет форму эллипса и что Солнце, источник движения, расположено в фокусе этого эллипса. Отсюда следует, что планета достигает среднего расстояния до Солнца между наибольшим расстоянием в афелии и наименьшим в перигелии, когда она проходит от афелия четвертую часть всей орбиты...»

Новое начинается, когда Кеплер доходит до восьмого тезиса. Здесь он формулирует свой знаменитый третий закон движения планет. На этот раз творческая лаборатория Кеплера остается скрытой от читателя. Мы не видим мучительных поисков истины, не являемся свидетелями многочисленных проверок. Кеплер стремится к главной цели — постижению гармонии мира, и третий закон при всей его важности остается в глазах Кеплера лишь средством для достижения цели. Немного истории и формулировка — вот все, что сообщает Кеплер о своем открытии.

«... Она [истинная пропорция между периодами обращения и размерами орбит] пришла мне в голову 8 марта сего [1618] года, когда мне потребовалось уточнить некоторые даты, однако рука моя не была удачливой, и я отверг свою догадку как ошибочную. Наконец, 15 мая та же мысль снова пришла мне в голову и со второй попытки рассеяла тьму моего духа. Между моей семнадцатилетней работой над наблюдениями Тихо и моими нынешними размышлениями возникло при этом столь полное согласие, что я было подумал, что все это мне снится и я принимаю желаемое за действительное. Однако совершенно достоверно и точно установлено, что пропорция между периодами обращения любых двух планет составляет ровно полторы пропорции их средних расстояний...»

Новое оружие сразу же было пущено в ход: в тезисах 11, 12 и 13 Кеплер, пользуясь третьим законом, находит зависимость между

*) Странным образом, он здесь не вспоминает о своем втором законе, возвращаясь к когда-то отброшенным рассуждениям.

расстояниями от Солнца до планет в афелии и перигелии и их наибольшей и наименьшей скоростью, а также определяет по экстремальным скоростям среднюю. Но не этот закон был главным для автора.

Главный вопрос Кеплер сформулировал так: «Где в движениях планет создатель запечатляет гармонические пропорции и каким образом это происходит?».

После долгих поисков он обратился к отношению угловых скоростей планет в афелии и перигелии: «Солнце гармонии засияло во всем блеске» — отношения экстремальных скоростей для внешних планет действительно оказались весьма близкими к гармоническим (Сатурн — 4 : 5, Юпитер — 5 : 6, Марс — 2 : 3).

Кеплер считал, что гармония возникает не только из отношений угловых скоростей в афелии и перигелии одной планеты, но и из отношений экстремальных скоростей двух планет, и различал эти два типа гармоний.

«Между введенными нами гармониями для одной планеты и гармониями двух планет имеется большое различие. Первые не могут возникнуть в какой-то определенный момент времени, для последних же это вполне возможно. Действительно, если какая-нибудь планета находится в афелии, то она не может одновременно находиться в противоположащем ему перигелии. Если же речь идет о двух планетах, то одна из них может находиться в афелии, а другая в тот же момент времени — в перигелии. В этой связи можно провести следующую аналогию. Гармонии, образуемые отдельными планетами, относятся к гармониям, образуемым парами планет, так же, как простое, или одногласное, пение, называемое хоральным, которое только и было известно древним, — к многоголосному, так называемому фигурированному пению, открытому в последнем столетии».

«Таким образом, небесные движения, — заключает Кеплер, — есть не что иное, как ни на миг не прекращающаяся многоголосая музыка (воспринимаемая не слухом, а разумом)».

Школа «Новой астрономии» не прошла даром. Приводя разнообразнейшие доводы, подтверждающие «гармоническую теорию», Кеплер все же не преминул обратиться к наблюдениям, чтобы с их помощью вынести окончательное суждение. Но и здесь его не оставляет неудержимая фантазия.

Небольшое расхождение между табличными значениями угловых скоростей планет в афелии и перигелии (относительно наблюдателя, находящегося на Солнце) и теоретическими, выведенными из геометрических соображений, гармоническими отношениями Кеплер объяснил тем, что небесный секстет должен звучать одинаково согласованно и в миноре, и в мажоре, а для этого планеты должны иметь возможность для настройки своих инструментов.

Исходя из гармонических отношений между экстремальными значениями угловых скоростей, Кеплер, используя второй и третий законы, вновь рассчитывает элементы орбит.

В итоге Кеплер приходит к заключению, что «все числа весьма близки к расстояниям, полученным мной из наблюдений Тихо».

Нашло свое объяснение и замеченное ранее расхождение между расстояниями, вычисленными в «Тайне мироздания», с одной стороны, и наблюдениями Браге и расстояниями, даваемыми гармонической теорией, — с другой. Геометрия правильных тел определяет лишь последовательность в расположении планет, уступая затем свою роль структурного принципа гармоническим отношениям: «Геометрический космос наиболее

совершенного расположения [правильных тел] не может сосуществовать наряду с наиболее гармоничным космосом».

Нам сейчас хорошо видно, что далеко не все здесь было победой. Круг на самом деле замкнулся, и Кеплер вернулся к началу своего пути. Ирония судьбы была в том, что он не оценил своих великих открытий. Без обычных подробностей он пишет в «Гармонии мира» о третьем законе. Второй закон он вообще ухитряется забыть. В поисках гармонии Кеплер захотел взять у нее больше, чем она содержала. Но увидеть гармонию в своих так внешне непохожих друг на друга законах было выше его сил. Для этого нужны были уравнения механики.

Больше Кеплер не возвращается к физике небес. Нет, он не перестал трудиться. В последние свои годы он завершает издание справочника «Tabulae Rudolphinae» [«Рудольфовы таблицы»], содержащего таблицы для вычисления положений планет и каталог 1005 звезд (из которых 777 взяты у Браге). Смерть (в 1630 г.) прерывает работу над «Somnium» («Сновидением») — первым научно-фантастическим романом о полете на Луну. Но о гармонии больше не было написано ни слова. Не было больше придирчивых проверок, не было новых гипотез. Кеплер устал:

«Мой мозг устает, когда я пытаюсь понять, что я написал, и мне уже трудно восстановить связь между рисунками и текстом, которую я сам когда-то нашел...».

Так закончилась драма. Со смертью Кеплера о его открытиях забывают. Даже мудрый Декарт ничего о них не знает. Галилей не считал нужным прочесть его книги. Только у Ньютона законы Кеплера обретают новую жизнь. Но Ньютона гармония уже не интересовала. У него были Уравнения. Пришли новые времена.



НИКОЛАЙ ГЕННАДИЕВИЧ
БАСОВ