

История и методология механики

Лекция № 9

Евгений Алексеевич Зайцев

e_zaitsev@mail.ru

План лекции

Предыстория. Античная и средневековая астрономия. «Спасение феноменов». Три подхода к моделированию движений планет.

Введение.

Часть А. Небесная механика Тихо Браге (1546-1601)

Часть В. Жизнь и творчество И. Кеплера (1571–1630)

Тема 1. Физические основы теории Кеплера. Понятие инерции

Тема 2. Законы И. Кеплера движения небесных тел

Тема 3. «Рудольфинские таблицы» И. Кеплера

Предыстория

Античная и средневековая астрономия. «Спасение феноменов».

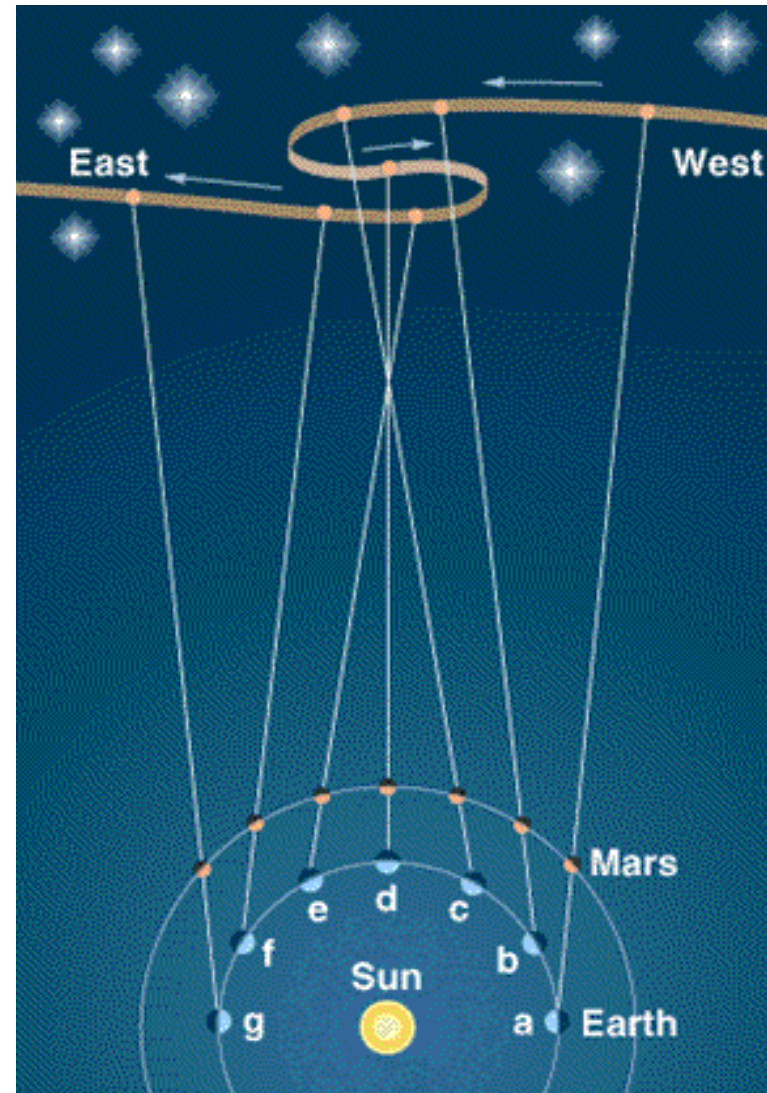
Три подхода к моделированию движений планет.

Основная проблема: Ретроградное движение планет (на примере Марса)

Марс – планета, траектория которой имеет самый большой эксцентриситет (траектория отличается от окружности в большей степени, нежели орбиты остальных планет).

Поэтому Марс имеет наиболее сложное ретроградное движение (если смотреть с Земли).

«Именно Марс хранил секрет всех планетных движений» (А. Кестлер).



Платон. Требования к планетарной модели

Симпликий (VI в. н.э.):

«Платон формулирует принцип кругового, равномерного, постоянного и правильного*) движения небесных тел.

Вслед за этим он ставит перед математиками такую проблему: какие круговые, равномерные и совершенно правильные движения следует принять в качестве гипотез, чтобы можно было спасти видимые образы**) движения планет?»

*) осуществляющегося в одном направлении

**) греч. феномены

Тезис Платона (расшифровка): **Всякое небесное движение описывается совокупностью простейших движений, состоящих из перемещений по окружностям в одном и том же направлении с постоянной скоростью.**

Постулаты небесной механики Платона:

(i) Траекториями движений являются окружности

(ii) Перемещения по этим окружностям осуществляются с постоянной скоростью.

Две основные модели небесных движений Физическая (механическая) и кинематическая

Физическая модель Евдокса (Аристотеля)

Трактовка небесного движения с физико-механической точки зрения ведет начало от модели Евдокса (Аристотеля).

Движения планет в этой модели определяются вращением концентрических сфер, к которым они жестко прикреплены («как гвозди на ободе колеса»). Сами планетные сферы состоят из прозрачной и твердой материи. Общим центром вращения сфер является Земля.

В основе модели лежит теория, в соответствии с которой движение сфер происходит под действием реальных сил. Эти силы имеют одушевленный характер.

Модель Евдокса (Аристотеля) отличается большой сложностью. Для объяснения движений всех 5 планет в ней требуется рассмотреть вращение 55 концентрических сфер вокруг осей с разными углами наклона.

Кроме того, она с трудом согласуется с наблюдениями.

Физическая модель (Евдокс – Аристотель)

Схема движения одной планеты

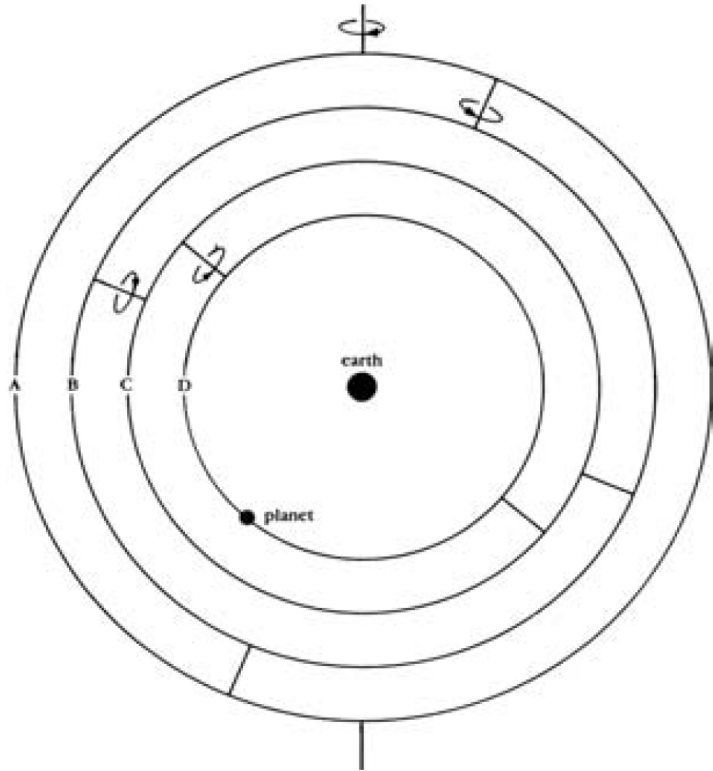
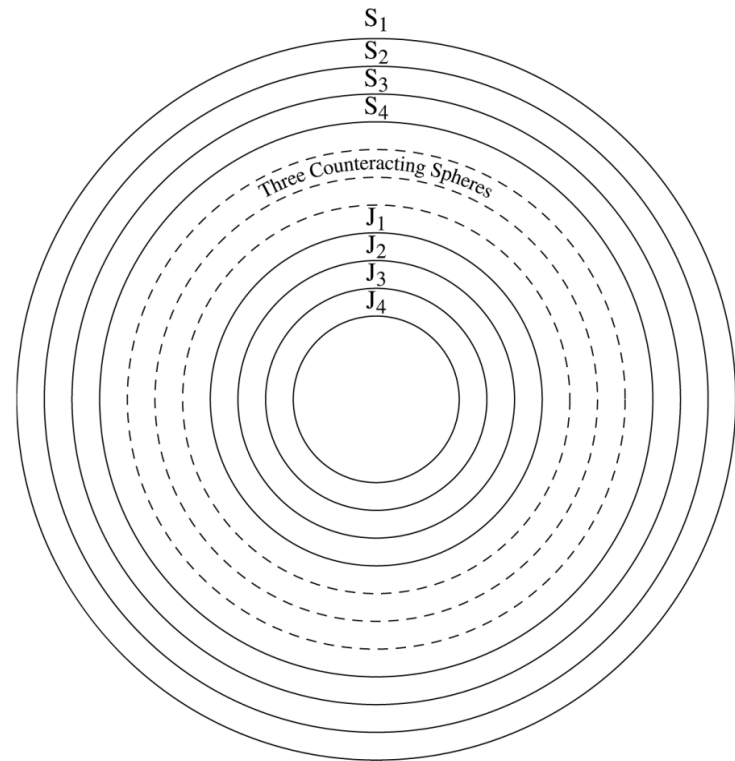
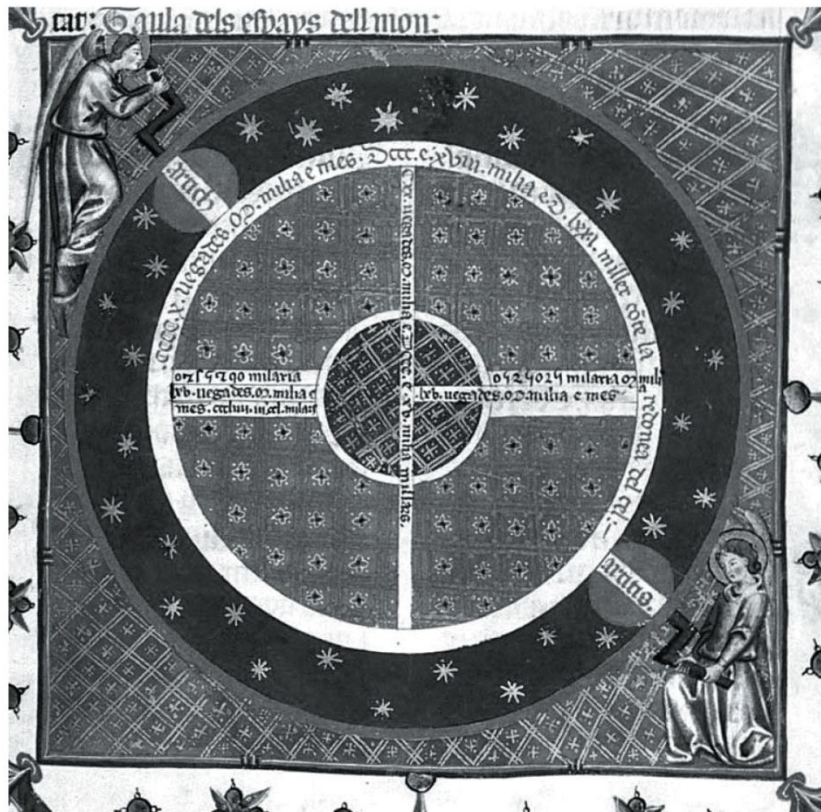


Схема движения двух соседних планет (Сатурн - Юпитер)



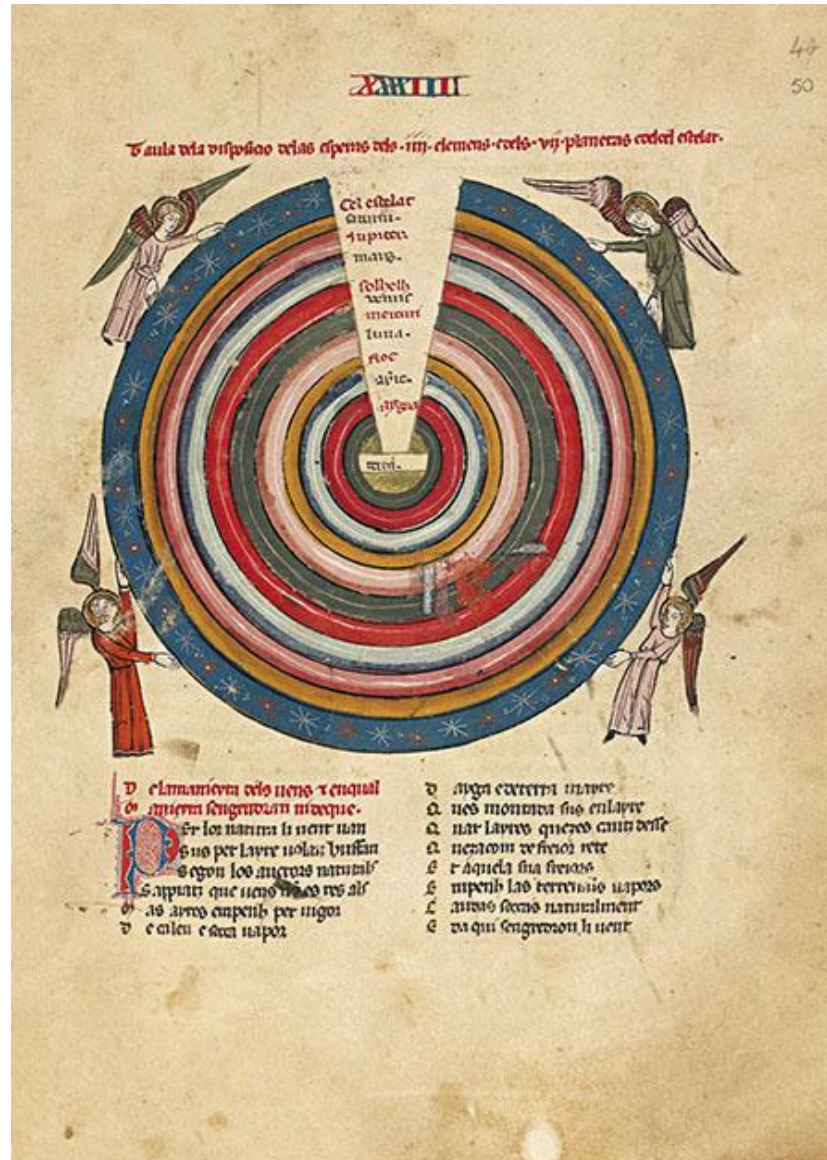
Механика движения небесных сфер в модели Аристотеля
(Breviari d'Amor, XIII-XIV вв.) Внешний «двигатель» (источник движения).



Matfre Ermengau de Bézier (13th-14th century)

Le breviari d'amor, 14th century. London, British Library, Ms. Royal 19.C.I., f. 50r

Angels turn the sphere of the world.



Anonymous. *The movements of the universe*, 1450-1500

Toledo, Museo de Santa Cruz.

The tapestry centres around a representation of the celestial sphere projected onto a plane, giving it an appearance similar to that of an astrolabe's rete.



Кинематическая модель движения планет

Теория Птолемея. «Спасение феноменов»

В кинематических моделях небесное движение сводится к кинематико-геометрическим построениям (без соотнесения с понятием силы).

Законченную форму кинематический подход приобрел в «Альмагесте» Птолемея (II в. н.э.).

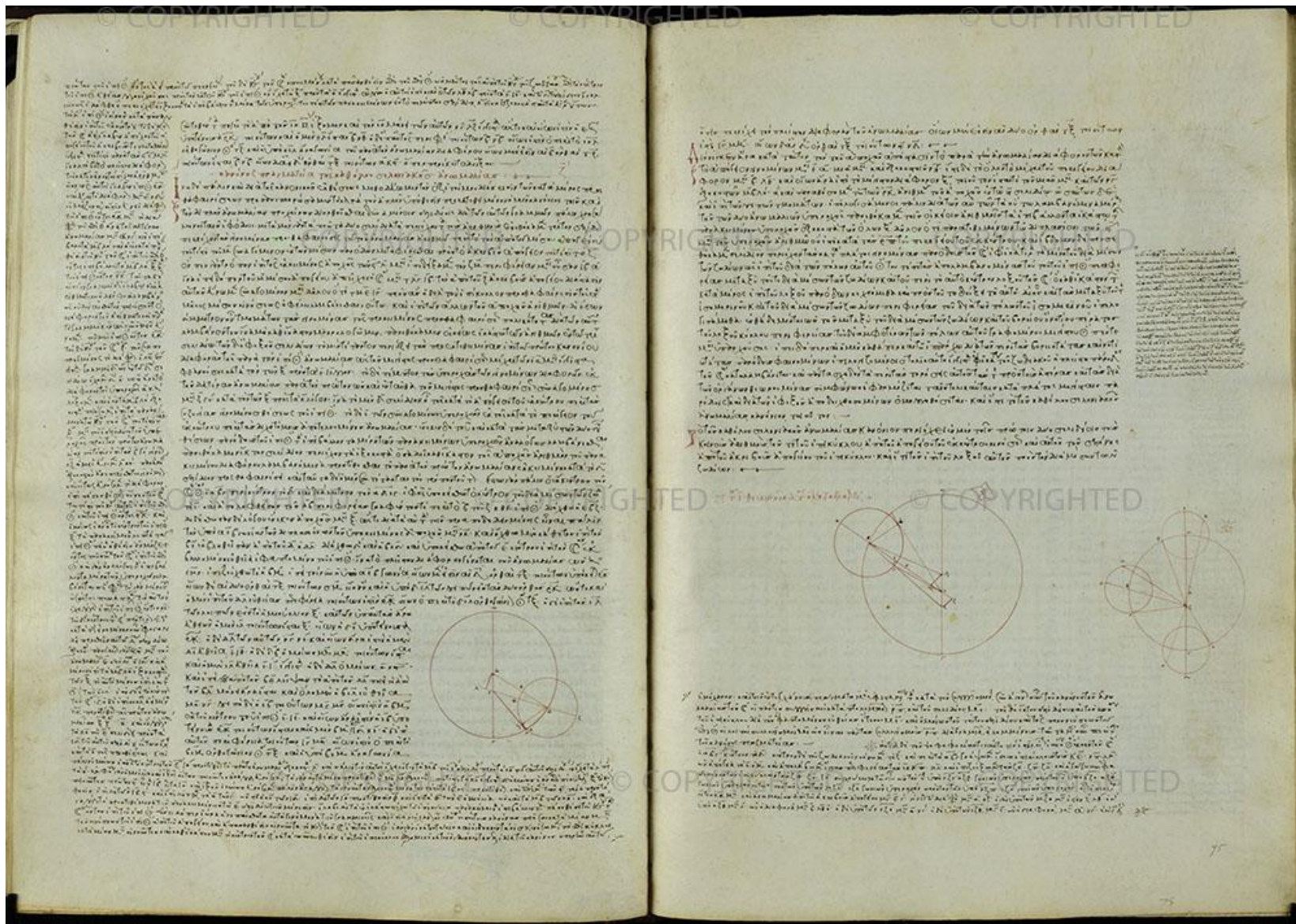
Реализован в двух основных вариантах:

- теория деферентов и эпициклов и
- теория кругового движения с эксцентрикой (центр вращения не совпадает с Землей).

Кинематический подход не претендовал на выражение истинного движения планет, т.е. не предполагал согласования физики с геометрией. Кинематические теории претендовали лишь на практическое удобство предсказания («спасение феноменов»)

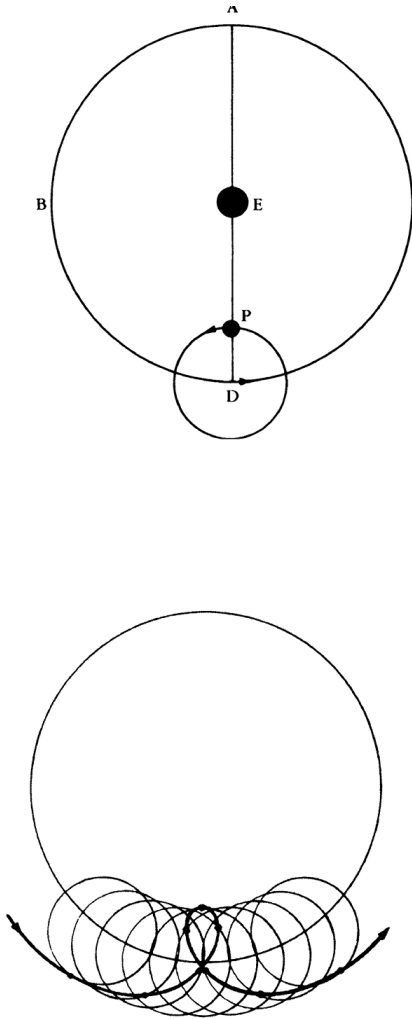
Теория Коперника, несмотря на революционность, базировалась на кинематическом подходе: для описания движения планет вокруг Солнца использовались эпициклы и круговые вращения с эксцентрикой.

Claudius Ptolemy (2nd century A.D.). *Almagest*, early 14th century
Florence, Biblioteca Medicea Laurenziana, Plut. 28.1, ff. 74v-75r

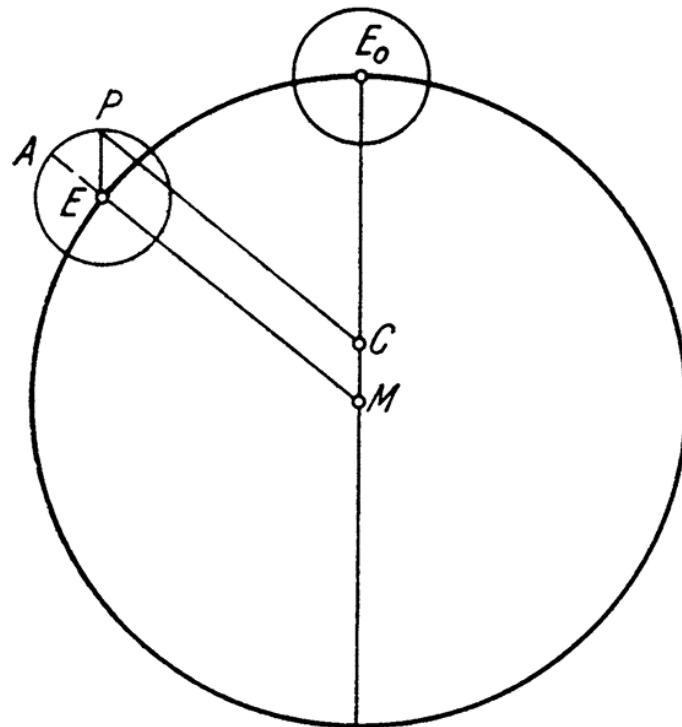


«Спасение феноменов» в кинематической модели Птолемея Деференты, эпициклы, эксцентрики. Эквивалентность двух кинематических теорий (эпициклов и эксцентриков)

Совокупное движение планеты по деференту и эпициклу



Если эпицикл E обращается с той же угловой скоростью, что и деферент M , но в противоположном направлении, то совокупное движение совпадает с движением с эксцентрикой в т. C .



Третий подход – на основе метафоры:
«Планеты на небе как птицы в воздухе или рыбы в воде»

«Возьмем птиц, которых мы видим, как пример движения тел, наблюдаемых на небе [...].

Когда птицы совершают одно из характерных для них движений, начало этого движения лежит в присущей им жизненной силе.

Эта жизненная сила порождает импульс, который затем распространяется в мышцы [...].

Таким же образом мы можем представить себе движение небесных тел.

Мы можем полагать, что каждая планета обладает соответствующей жизненной силой и движется сама.

[...] Движение переходит сначала к эпициклу, затем к эксцентрику, а затем к окружности с центром в середине вселенной».

Птолемей, «Планетарные гипотезы»

Третий подход – метафорический
«Планеты на небе как птицы в воздухе и рыбы в воде»

Характерные черты третьего подхода

1. Сравнение с «птицами в воздухе или рыбами в воде» позволяет объяснить разнообразие в поведении планет, которые движутся по различным траекториям с разными скоростями.
2. Метафора также подчеркивает собственную активность планет.
3. Модель «как птицы в воздухе или рыбы в воде» предполагает, что небеса проницаемы, т.е. небесные сферы состоят из «жидкой» и прозрачной материи, типа эфира.
4. Забегая вперед: у Кеплера планеты плывут в потоке эфира подобно лодкам в водном потоке, движимым гребцами.

Метафора небесного движения:
«Планеты на небе как птицы в воздухе и рыбы в воде»
Средние века

Иоанн Буридан, Комментарий к трактату «О Небе» Аристотеля (сер. XIV в.):

Планета движется по небу, «сквозь ее сферы, подобно тому, как птица летит по воздуху или рыба плавает в воде, или даже как человек ходит по воздуху».

Сторонникам теории твердых (кристаллических) сфер такое сравнение, напротив, представлялось нелепым.

Эгидий Римский (1246 — 1316) писал, что сам образ «птицы в воздухе или рыбы в воде» убеждает в абсурдности гипотезы о свободном движении планет сквозь «жидкое» небо.

Джованни Понтано (1429—1503) – глава Неаполитанской академии

«... эпициклы, введенные греческими астрономами, представляют описание маленьких окружностей, по которым тела, соответствующие планетам, перемещаются вперед и назад, вверх и вниз так, что движение каждого из этих тел сохраняет свою меру ...; однако нелепо думать, что сами звезды (т.е. планеты) находятся на окружностях и несутся по ним как будто в колесницах».

Разумнее предположить, что «небесные тела совершают свое движение и обращение по собственной воле и благодаря особой присущей им силе [...], подобно рыбам или птицам [...], которые движутся, направляясь то вперед, то назад в согласии с выбранным курсом».

De rebus coelestibus (1518-19)

Роберт Беллармин (1542-1621)

Лекции в университете Лувена (1572)

«...звезды (планеты) не движутся вместе с движениями неба, **они движутся сами по себе, как птицы в небе и рыбы в воде**. Ведь известно, что движение планет различно: одна [движется] быстрее, другая медленнее, и всем очевидно, что одно и то же небо не может двигаться одновременно с разными скоростями».

В XVI-XVII вв. сходной точки зрения придерживались ученые-иезуиты:
Borro, Blancanus, Scheiner, Arriago.

Окончательный отказ от модели кристаллических сфер произошел в конце XVI в. в результате наблюдений Тихо Браге за кометами.

Гео-гелиоцентрическая система Тихо Браге (1546-1601).

Компромиссная попытка согласовать физический подход с кинематическим

«Приготовление к обновленной астрономии» (1582 г.)

Браге противопоставляет свою систему и системе Птолемея, и системе

Коперника:

«**Эта тяжелая масса Земли, столь нерасположенная к движению**, не может быть приведена в движение и перемещена без противоречия с принципами физики.

Этому положению противостоит также авторитет Священного Писания...

Моим намерением было серьезно исследовать, существует ли какая-нибудь гипотеза, полностью согласующаяся с явлениями и математическими принципами, которая не противоречила бы физике и не вызывала нареканий со стороны теологии.

Мне удалось получить то, на что я надеялся ...»

Гео-гелиоцентрическая система (описание Тихо Браге)

«Я твердо и безоговорочно верю в то, что неподвижную Землю следует поместить в центр Мира, в соответствии с мнением древних астрономов и физиков, а также свидетельством Св. Писания.

Вместе с тем, я никоим образом не согласен с Птолемеем и древними в том, что Земля – это центр вспомогательных орбит (для эпициклов).

Я скорее верю в то, что небесные движения устроены таким образом, что только Луна, Солнце и Восьмая Сфера – самая удаленная из всех – имеют Землю центром своего движения. Пять других планет вращаются вокруг Солнца, как вокруг своего Главы и Царя;

при этом Солнце всегда находится в центре их сфер, сопровождая планеты своим годовым движением. Таким образом, Солнце определяет законы и цели всех оборотов планет и, подобно Аполлону среди муз, оно одно ответственно за небесную гармонию окружающих его движений».

У Коперника планеты вращаются вокруг Солнца по орбитам с эксцентрикой. Солнце физически никак не участвует в определении характера их движений.

Введение (А)

Небесная механика Тихо Браге

Небесная система Тихо Браге (1546-1601)

Значение работ Тихо Браге для астрономии:

1. Колоссальный объем и высокая точность проделанных Тихо Браге наблюдений, ставших основной для формулировки законов Кеплера.
2. Создание смешанной гео-гелиоцентрической системы мира, в которой Солнце вращается вокруг Земли, а остальные планеты вокруг Солнца.
3. Отказ от модели твердых небесных сфер.

Тихо Браге отвергал систему Птолемея из-за ее сложности (чрезмерное умножение числа эпициклов).

Систему Коперника он не принимал, в основном, из религиозных соображений.

Тихо Браге об (относительном) превосходстве системы Коперника над системой Птолемея:

«Я признаю, что вращение пяти планет, которое древние объясняли при помощи эпициклов, легко и с небольшими затратами объясняется простым движением Земли, что Коперник отбросил многие нелепости и противоречия, разделявшиеся прежде, и что при этом его система несколько точнее согласуется с небесными явлениями».

Гео-гелиоцентрическая система Тихо Браге

В работе «Приготовление к обновленной астрономии» (1582 г.) Тихо Браге так описывает свою систему (противопоставляя ее системам Птолемея и Коперника):

«Эта тяжелая масса Земли, столь нерасположенная к движению, не может быть приведена в движение и перемещена без противоречия с принципами физики.

Этому положению противостоит также авторитет Священного Писания...

Моим намерением было серьезно исследовать, существует ли какая-нибудь гипотеза, полностью согласующаяся с явлениями и математическими принципами, которая не противоречила бы физике и не вызывала нареканий со стороны теологии.

Мне удалось получить то, на что я надеялся ...»

Гео-гелиоцентрическая система Тихо Браге (продолжение)

«Я твердо и безоговорочно верю в то, что неподвижную Землю следует поместить в центр Мира, в соответствии с мнением древних астрономов и физиков, а также свидетельством Св. Писания.

Вместе с тем, я никоим образом не согласен с Птолемеем и древними в том, что Земля – это центр вспомогательных орбит (для эпициклов).

Я скорее верю в то, что небесные движения устроены таким образом, что только Луна, Солнце и Восьмая Сфера – самая удаленная из всех – имеют Землю центром своего движения.

Пять других планет вращаются вокруг Солнца, как вокруг своего Главы и Царя; при этом Солнце всегда находится в центре их сфер, сопровождая планеты своим годовым движением.

Таким образом, Солнце определяет законы и цели всех оборотов планет и, подобно Аполлону среди муз, оно одно ответственно за небесную гармонию окружающих его движений».

Введение (В).

Жизнь и творчество И. Кеплера

Иоганн Кеплер (1571–1630)

Портрет кисти неизвестного художника (1620)



Иоганн Кеплер (27 декабря 1571 –15 ноября 1630)

1589 – Кеплер окончил монастырскую школу, проявив выдающиеся способности. Городские власти назначили ему стипендию для помощи в дальнейшем обучении.

1591 – поступил в университет г. Тюбинген — сначала на факультет свободных искусств, к которым тогда причисляли и математику с астрономией, затем перешёл на теологический факультет. Первоначально Кеплер планировал стать священником. В Университете впервые услышал (от своего учителя М. Местлина) о теории Коперника и стал её убежденным сторонником.

1594 – благодаря незаурядным математическим способностям был приглашен году читать лекции по математике в университет города Граца (Австрия). В Граце Кеплер провёл 6 лет.

1596 – вышла в свет его первая книга «Космографическая тайна».

В этой книге Кеплер, веривший в наличие в мире скрытой математической гармонии, построил гелиоцентрическую систему, основанную на 5 платоновых телах.

Тихо Браге и Иоганн Кеплер

- В 1600 году Кеплер и Браге встретились в Праге. Оба на службе у императора Рудольфа II. Проведённые здесь 10 лет — самый плодотворный период жизни Кеплера.
- Взгляды Коперника и Кеплера на астрономию Тихо Браге разделял только отчасти. Чтобы сохранить геоцентризм, Браге предложил компромиссную модель. Эта теория получила большую известность и в течение нескольких десятилетий являлась основным конкурентом системы мира Коперника.
- Будучи великолепным наблюдателем, Тихо Браге за много лет составил объёмный труд по наблюдению планет и сотен звезд, причём точность его измерений была существенно выше, чем у всех предшественников. Для повышения точности Браге применял как технические усовершенствования, так и специальную методику нейтрализации погрешностей наблюдения.
- После смерти Браге в 1601 году Кеплер стал его преемником в должности. Казна императора из-за нескончаемых войн была постоянно пуста, жалованье Кеплеру платили редко и скудно. Он вынужден был подрабатывать составлением гороскопов.

Иоганн Кеплер (1571 – 1630)

1609 – публикация главной астрономической работы Кеплера «Новая астрономия». В ней Кеплер сформулировал первые два из трех законов, носящих его имя.

Новая модель движения планет вызвала определенный интерес среди сторонников теории Коперника, но приняли ее очень немногие.

Галилей, например, на протяжении все своей жизни ни словом не обмолвился об эллиптических орбитах Кеплера (хотя был знаком с содержанием его работ).

1618-1621 – публикация второй важной работы «Краткое изложение коперниканской астрономии (в трёх томах).

1619 – Публикация трактата «Гармония мира», в которой сформулирован 3-ий закон Кеплера.

Фрагмент из «Гармонии мира»:

«Я выяснил, что все небесные движения, как в их целом, так и во всех отдельных случаях, проникнуты общей гармонией, правда, не той, которой я предполагал, но ещё более совершенной».

1630 – болезнь и смерть Кеплера.

Основные труды Кеплера

- **1596** – *Mysterium Cosmographicum* (Космографическая тайна)
- 1604 – *Astronomiae Pars Optica* (Оптика в астрономии)
- 1604 – *Ad Vitellionem paralipomena* (Дополнения к Вителлию), оптика зрения
- **1609** – *Astronomia nova* (Новая астрономия)
- 1611 – *Dioptrice* (Диоптрика)
- 1611 – *De nive sexangula* (О шестиугольных снежинках)
- 1615 – *Nova stereometria doliorum vinariorum* (Новая стереометрия винных бочек)
- **1618—1621** – *Epitome Astronomiae Copernicanae* (Краткое изложение коперниканской астрономии, в трёх томах)
- **1619** – *Harmonice Mundi* (Гармония мира)
- 1627 – *Tabulae Rudolphinae* (Рудольфинские таблицы)
- 1634 – *Somnium* (Сон, или Посмертное сочинение о лунной астрономии», фантастический рассказ о полёте на Луну)

Тема 1.

Физические основы теории Кеплера.

Понятие инерции

Физическая астрономия Кеплера

1. В системе Кеплера Солнцу отводилась исключительную роль. Оно служило не только источником света и тепла, но и активным «движителем», приводящим в движение планеты (включая Землю). Передача движения от Солнца к планетам происходила примерно так, как передается движение от оси колеса через спицы на его обод. Согласно этой схеме, Солнце – это своего рода втулка, снабженная «спицами», на которых на разных расстояниях от оси помещаются планеты.

2. Согласно Кеплеру, Солнце обладает душой, которая приводит его во вращение вокруг неподвижной оси, преодолевая при этом сопротивление своей собственной косной материи. Вместе с Солнцем вокруг этой оси вращается исходящее от него истечение (его Кеплер называет «образ» - species). Этот солнечный «образ» обладает способностью «схватывать» планеты, увлекать за собой, заставляя вращаться вместе с ним вокруг Солнца. «Образ» распространяется мгновенно в виде своего рода сферической волны. Он играет роль, аналогичную спицам колеса: планеты прикреплены к «образу», как будто находятся на спицах. Отличие состоит в том, что планеты толкают не жесткие стержни, а «невещественные образы» (species immateriata).

3. На модель «колеса со спицами» Кеплер опирался и в «Новой астрономии» (1609), и в «Кратком изложении коперниканской астрономии» (1618-1621).

Как Солнце может вращать планеты?

Кеплер: *«Верно ли, что вращением своего тела Солнце заставляет вращаться планеты? И как это может быть, если у Солнца нет рук, которыми оно могло бы схватить планеты, которые находятся на столь большом расстоянии, и своим вращением заставить планеты вращаться вместе с ним?»*

Вместо рук [Солнце] использует силу своего тела, которая распространяется по прямой линии по всему пространству мира и которая – будучи «образом» тела – вращается вместе с солнечным телом подобно очень быстрому вихрю, перемещаясь с одинаковой скоростью по всему радиусу обращения, каким бы большим он не был. [При этом само] Солнце вращается в очень узком интервале вокруг центра» («Краткое изложение коперниканской астрономии»)

Модель «колеса со спицами» неплохо согласуется с эмпирическими фактами (на качественном уровне), поскольку:

- планеты вращаются вокруг Солнца в одном направлении,
- их орбиты располагаются в узком сегменте вдоль эклиптики.

Недостаток модели. Из нее следует, что планеты, подобно частям колеса, должны вращаться вокруг Солнца с одинаковой угловой скоростью и равномерно. Такой вывод противоречил, однако, данным астрономических наблюдений. Движение планет происходит с разными угловыми скоростями и не является равномерным.

Понятие инерции

1. Понятие инерции (*inertia*) вводится Кеплером для объяснения различий в угловых скоростях планет. Будучи косными материальными телами, планеты обладают «стремлением к покою», которое оказывает сопротивление движению. При этом сила сопротивления зависит от «количества материи» планеты. Другая причина – уменьшение движущей силы с увеличением расстояния от Солнца.

2. Вводя понятие инерции, Кеплер исходил из повседневного опыта, согласно которому находящееся в покое тяжелое тело сопротивляется попыткам вывести его из этого состояния. Как и его средневековые предшественники, он считал «стремление к покою» внутренним свойством тела, сохраняющемся и тогда, когда тело приведено в движение. Свойственное земным телам «стремление к покою» Кеплер перенес на небесные светила.

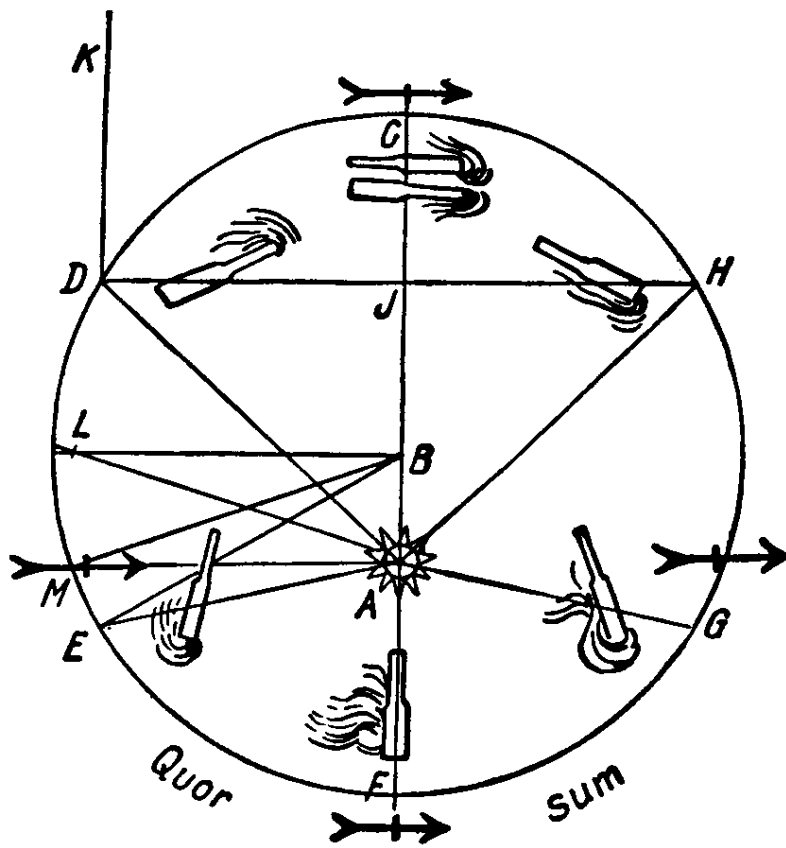
3. Основная схема. Солнце посредством исходящего от него «образа» воздействует на планеты, заставляя их следовать своему вращению. В силу стремления к покою, планеты сопротивляются действию этого «образа»; при этом. Это – чистая физика.

4. Опираясь на эту фантастическую с современной точки зрения схему, Кеплер получил законы движения планет, носящие его имя.

Механические и физические модели Кеплера

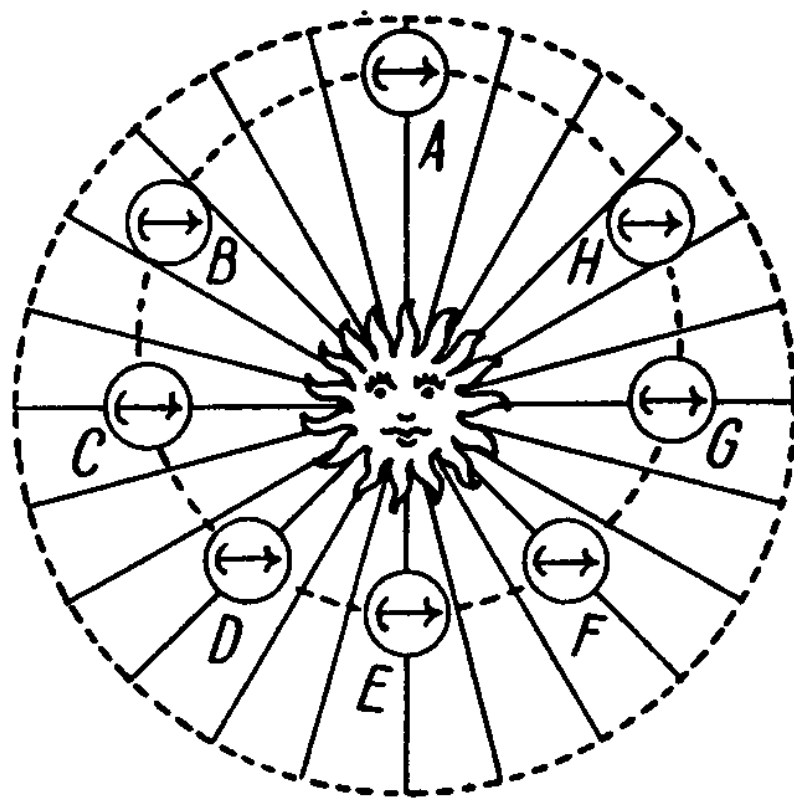
Механическая модель.

Планеты как лодки в водном потоке
«Новая астрономия».



Физическая модель.

Планеты как магниты
«Краткое изложение коперниканской астрономии»



Инерция («стремление к покою») как физическая величина

По замыслу Кеплера, инерция должна была стать не просто качественным параметром, но настоящей физической величиной (подобно весу), с которой можно было бы работать математически.

О том, что инерция планеты подразумевает возможность количественной оценки, свидетельствует следующий фрагмент из «Новой астрономии»:

Рубрика (вопрос):

«Почему скорость планет не может сравняться по величине со скоростью их движителя – невещественного образа Солнца?»

(Ответ)

«... движущая сила [«образ Солнца»] способна сообщить планете скорость, столь же большую, как собственная [скорость вращения Солнца]. Но скорость планеты не столь велика [как скорость вращения Солнца] потому, что либо среда, то есть, материя небесного эфира, либо стремление самого движущегося тела к покою оказывает сопротивление. ...

Период обращения планеты зависит от *отношения* движущей силы к указанным факторам».

«Новая астрономия» (гл. 33)

Закон движения по Кеплеру (попытки реконструкции)

Для определения периода обращения планет необходимо было ввести количественную оценку силы сопротивления, вызываемого «стремлением к покою». Полностью решить эту задачу Кеплеру не удалось.

Тем не менее, из его рассуждений можно извлечь следующий закон :

скорость планеты зависит от отношения силы движения, исходящей от Солнца, к силе сопротивления (силе инерции), вызываемой стремлением планеты к покою.

Закон, который имел в виду Кеплер, можно тогда выразить при помощи формулы

$$v \div F/m,$$

где v – скорость планеты, F – движущая сила Солнца, m – величина, характеризующая сопротивление движению или стремление к покою.

Источник «формулы Кеплера» – «аристотелевская динамика» (Аристотель, «Физика» VII, 5): скорость пропорциональна отношению движущей силы к силе сопротивления.

Модифицированный закон движения по Кеплеру

В работах Кеплера есть, однако, фрагменты, в которых отмечено, что в отсутствии сопротивления скорость планеты будет не бесконечной, но равной скорости движения «самой силы», исходящей от Солнца и вращающейся вместе с ним.

Кеплер: «движущая сила способна сообщить планете скорость, столь же большую, как ее собственная [скорость]».

Это означает, что движущая сила Солнца задает вполне определенную скорость вращения, равную скорости вращения «образа» или «спиц» солнечного колеса.

Поэтому формулу движения Кеплера следует, по-видимому, исправить, записав в следующем виде:

$$v \div F/(1 + m).$$

Модифицированный закон движения по Кеплеру

Гипотеза о том, что $v \div F/(1 + m)$, находит подтверждение в следующем фрагменте «Краткого изложения коперниканской астрономии»:

«Ибо единый движитель [Солнце] одним только своим вращением перемещает шесть планет ...

Если бы планеты не обладали естественным сопротивлением фиксированной величины, то не было бы причин, по которым они не следовали бы точно за вращательным движением своего движителя и, таким образом, не совершали бы полный оборот вместе с ним за одно и то же время.

Однако, хотя все они идут в том же направлении, в котором вращается движитель, ни одна из них не достигает в полной мере скорости движителя; кроме того, одни [планеты] движутся медленнее других.

Следовательно, они (планеты) смешивают в определенной пропорции быстроту движителя с инерцией своей материи».

Тема 2.

Законы И. Кеплера движения небесных тел

Законы Кеплера

А. Эйнштейн о Кеплере:

«Он жил в эпоху, когда ещё не было уверенности в существовании некоторой общей закономерности для всех явлений природы. Какой глубокой была у него вера в такую закономерность, если, работая в одиночестве, никем не поддерживаемый и не понятый, он на протяжении многих десятков лет черпал в ней силы для трудного и кропотливого эмпирического исследования движения планет и математических законов этого движения!

Сейчас, когда эти законы уже установлены, трудно себе представить, сколько изобретательности, воображения и неустанного, упорного труда потребовалось, чтобы установить эти законы и со столь огромной точностью выразить их».

Анекдот про салат...

Три закона Кеплера

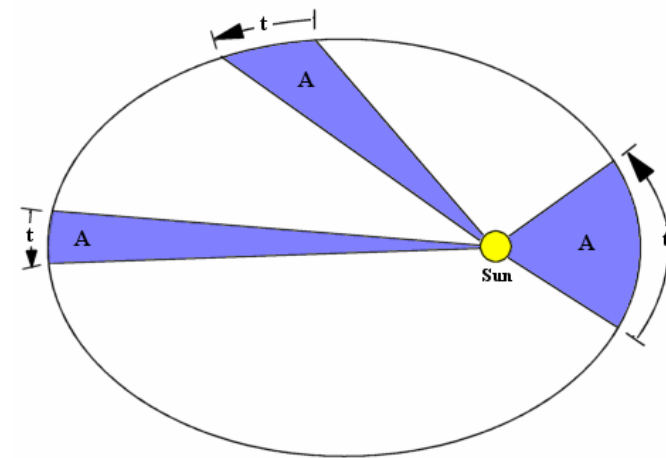
1-ый закон: Планеты движется по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

2-ой закон: За равные промежутки времени их радиус-векторы заметают равные площади.

Перигелий – ближайшая к Солнцу точка орбиты; афелий – наиболее удалённая точка орбиты.

Из 2-го закона следует, что планеты движутся вокруг Солнца неравномерно: в перигелии их линейная скорость больше, чем в афелии. В январе Земля, находясь в перигелии, движется быстрее, а в июле, находясь в афелии, – медленнее.

3-ий закон: Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся, как кубы больших полуосей их орбит.



Последовательность открытия законов Кеплера:

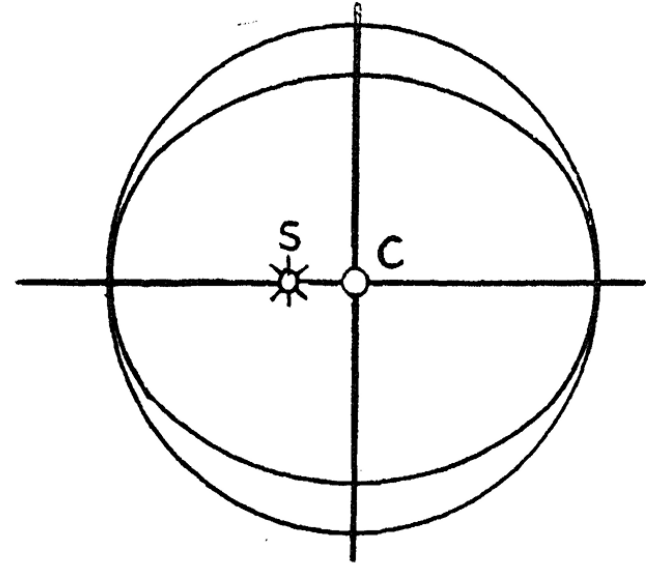
2-ой → 1-ый → 3-ий

На пути ко 2-му закону. Предварительные шаги (необходимые нововведения)

Взявшись за решение проблемы Марса, Кеплер еще не знал, что планетные орбиты являются эллипсами.

В тот момент он, как и Коперник, полагал, что планеты движутся по круговым орбитам и что это движение является вращением с эксцентрикой:

Т. е. планеты вращаются по окружности вокруг центра – точки С, не совпадающей с точкой S, в которой находится Солнце.



На пути ко 2-му закону. Предварительные шаги (необходимые нововведения)

Первое нововведение:

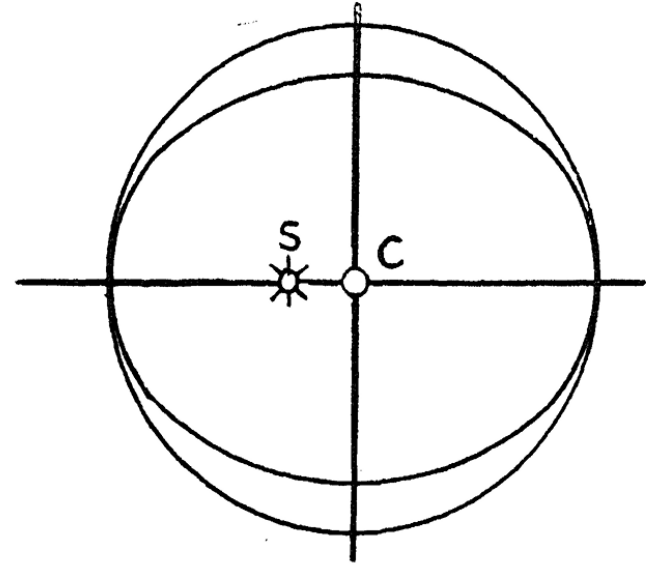
В основе теории Кеплера лежит представление о том, что движения планет осуществляются под действием силы, исходящей от Солнца.

Но тогда возникает вопрос: если сила, движущая планету, исходит от Солнца, то почему планета вращается вокруг точки С?

Ответ Кеплера: движение планеты определяется действием двух противодействующих сил: силы Солнца и силы, находящейся внутри самой планеты. В результате планета в своем вращении то приближается к Солнцу, то удаляется от него.

С этого «открытия» начинается ФИЗИЧЕСКАЯ астрономия – наука, строящаяся на основе понятия силы, а не геометрических фикций (эпициклов).

Астрономия Кеплера – «небесная динамика» (в отличие от кинематической астрономии Птолемея и Коперника).



На пути ко 2-му закону. Второе нововведение

Астрономы до Кеплера исходили из постулата Платона о том, что всякое планетарное движение сводится к композиции движений по окружностям, происходящих с постоянной скоростью.

Второе нововведение:

Отказ от представления о постоянстве скорости (с сохранением идеи движения по окружностям). Отказ обосновывался, исходя из ФИЗИЧЕСКИХ соображений. Если Солнце приводит планеты в движение, то оно должно сильнее действовать на планету, когда та находится ближе к нему, и слабее, когда она удалена от него. Поскольку скорость зависит от силы, планета будет двигаться быстрее или медленнее в зависимости от расстояния до Солнца.

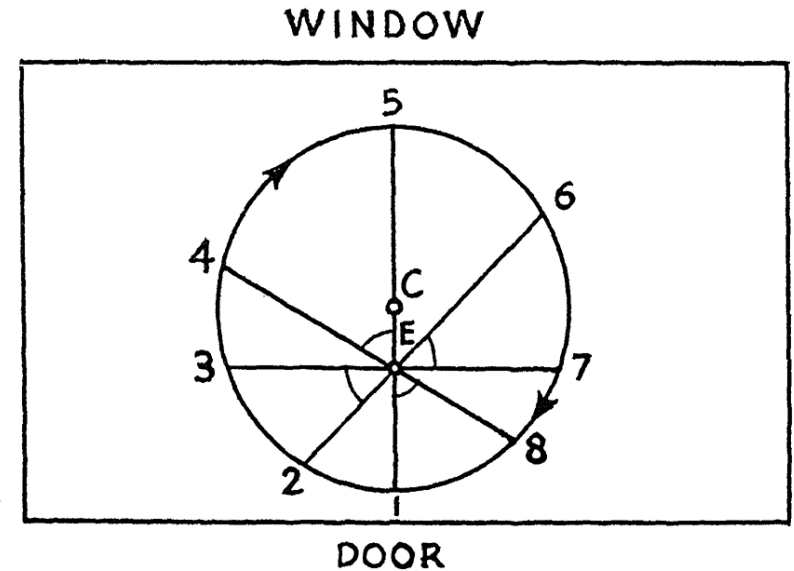
Понятие «эквант». Представим, что планета движется по окружности, а ее скорость при этом изменяется (по некоторому простому закону).

Эквант – это точка внутри ее орбиты, из которой движение планеты ВЫГЛЯДИТ (представляется наблюдателю) как равномерное. Иначе говоря, эквант – это точка, вокруг которой радиус-вектор планеты вращается с постоянной угловой скоростью.

Понятие экванта (элементарное объяснение идеи по А. Кестлеру)

Представим, что окружность – это рельсовая дорога, по которой движется игрушечный поезд. Пусть вблизи окна поезд движется быстрее, чем вблизи двери. Если предположить, что периодические изменения скорости следуют простому правилу, то тогда найдется «точка равенства» (*punctum equans*) E , из которой будет казаться, что поезд движется с постоянной скоростью. Чем ближе мы находимся к движущемуся поезду, тем быстрее, как нам кажется, он движется. Значит, «точка равенства» E будет находиться где-то между центром C и дверью.

Для наблюдателя, находящегося в этой точке, поезд будет двигаться с постоянной угловой скоростью.



Формулировка 2-го закона

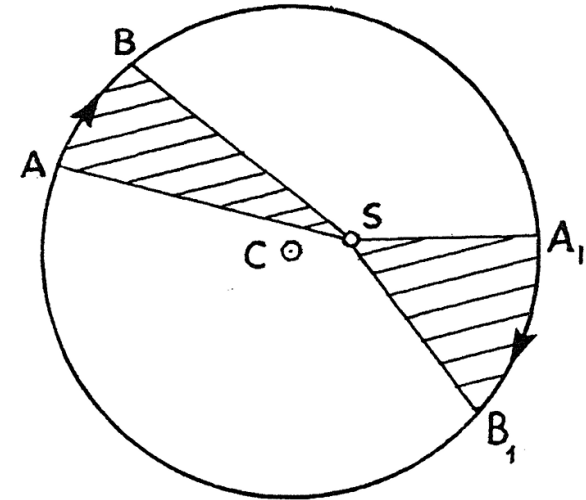
Поупражнявшись с идеей экванта и постоянства угловой скорости, Кеплер оставляет эту идею и снова обращается к модели вращения с эксцентрикой (Солнце находится вне центра круговой орбиты).

Он делает следующее предположение: скорость движения планеты по орбите обратно пропорциональна расстоянию до Солнца.

Соответственно, время, затрачиваемое на прохождение некоторой малой дуги прямо пропорционально расстоянию от нее до Солнца.

Кеплер делит круговую орбиту на 360 частей и вычисляет расстояние каждой из этих частей до Солнца.

Например, сумма всех расстояний между 0° и 85° является «мерой» времени, за которое планета проходит это расстояние.



$$\text{Area } \overline{ABS} = \text{Area } \overline{A_1B_1S}$$

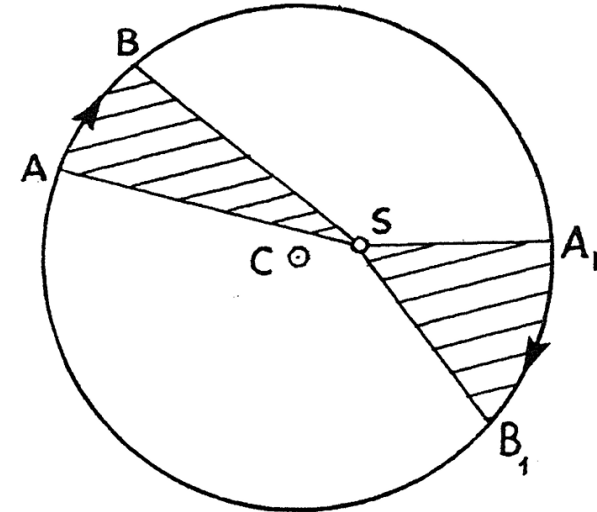
Формулировка 2-го закона

Поскольку процедура подсчета расстояний является «механической и утомительной», Кеплер начинает искать нечто более простое.

Кеплер: «Поскольку я понимал, что существует бесконечное число точек на орбите и, соответственно, бесконечное число расстояний [от Солнца], мне пришла в голову мысль, что сумма этих расстояний *содержится* в площади орбиты. Ибо я вспомнил, что таким же образом Архимед разделил площадь круга на бесконечное число треугольников».

Отождествление суммы расстояний с площадью позволяет Кеплеру сделать вывод, что площадь сектора, например, ASB , также является «мерой» времени, затрачиваемого на перемещение из A в B .

Следствие: если время перемещения из A в B равно времени перемещения из A_1 в B_1 , то площадь, заметаемая радиусом-вектором SA равна площади, заметаемой радиусом вектором SA_1 . Так был получен 2-ой закон Кеплера для **движения планет по окружности**.



$$\text{Area } \overline{ABS} = \text{Area } \overline{A_1B_1S}$$

На пути ко 1-му закону Кеплера

2-ой закон определял характер изменения скорости движения, но не настоящую ее форму. Кеплер это понимал, видя, что его теоретические выкладки – в предположении круговой орбиты – давали в случае Марса ошибку в 8' по сравнению с данными наблюдений.

В итоге он отбросил и вторую фундаментальную идею традиционной философии – что в основе движения планет лежит перемещение по окружности.

Кеплер писал: «Вывод прост: путь планеты — это не окружность; на деле он изгибается внутрь с обеих сторон и снова наружу на противоположных концах. Такая кривая называется овалом. Таким образом, орбита представляет собой не круг, а овальную фигуру».

Но овал в качестве орбиты Кеплер допустить не мог, ибо такая фигура разрушала Божественную гармонию....

На пути ко 1-му закону Кеплера

И тут Кеплер возвращается к традиционной идее – объяснению движений планет при помощи эпицикла.

Но вводит в нее новый элемент.

Если для старой астрономии эпицикл – геометрическая фикция, призванная «спасти феномены», то Кеплер попытался объяснить его существование ссылкой на физические причины.

Это представление о том, что движение планеты определяется действием двух сил – силы Солнца, которое своим вращением увлекает планету за собой, и силы, находящейся в самой планете, которая действует в противоположном направлении, заставляя планету двигаться по эпициклу.

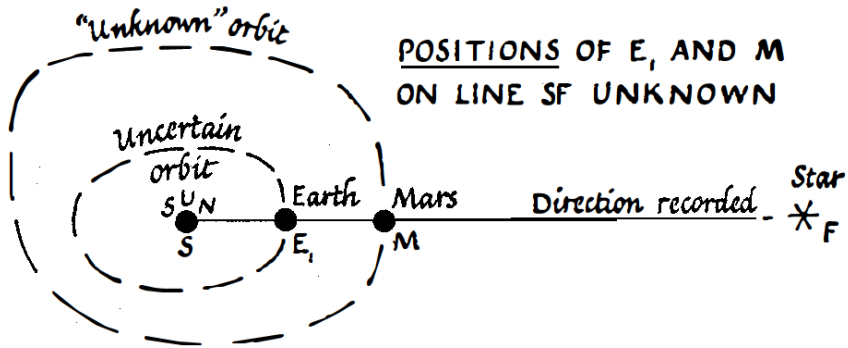
В результате последующих попыток овал превратился в «яйцо» с тупым и острым концом....

Затем и эта гипотеза была отвергнута...

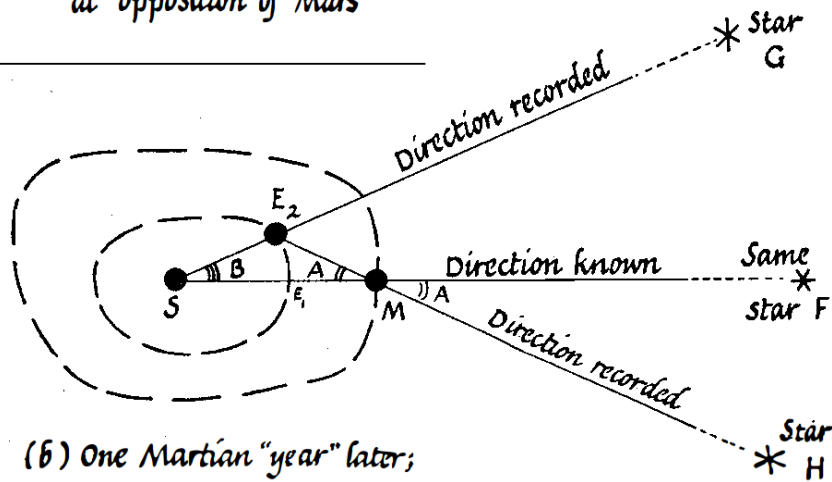
В конце извилистого пути Кеплер, наконец, находит правильную форму орбиты – эллипс.

Параллельно с нахождением правильного ответа на вопрос о форме траектории происходит радикальное изменение в содержании самой науки астрономии. Из геометрической она превращается в физическую.

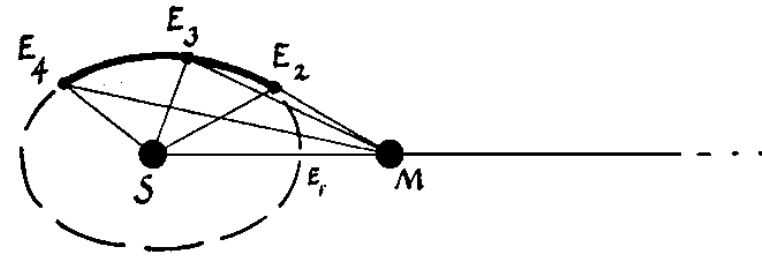
Нахождение эллиптической орбиты Марса



(a) Directions recorded at "opposition" of Mars



(b) One Martian "year" later; Mars must be in same position



(c) Construction of Earth's orbit

Построив по точкам орбиту Земли, Кеплер, обратив задачу, использовал ее для построения орбиты Марса (по 40 точкам). После ряда неудачных попыток, он пришел, наконец, к выводу о том, что орбитой Марса является эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Аналогичный результат был получен для прочих планет, включая Землю.

И, наконец, для эллиптических орбит Кеплер переформулировал свой второй закон.

Тема 3.

«Рудольфинские таблицы» И. Кеплера

«Рудольфинские таблицы»

В 1627 году, после 22 лет трудов, Кеплер опубликовал (за свой счёт) астрономические таблицы, которые в честь своего покровителя и работодателя императора Рудольфа II назвал «Рудольфинскими».

Спрос на них был огромен, так как все прежние таблицы давно разошлись с наблюдениями.

Помимо прочего, труд впервые включал удобные для расчётов таблицы логарифмов.

Кеплеровы таблицы служили астрономам и морякам вплоть до начала XIX века.