

# История и методология механики

Лекция № 4

Евгений Алексеевич Зайцев

[e\\_zaitsev@mail.ru](mailto:e_zaitsev@mail.ru)

## План лекции

Тема 1. Зарождение учения о движении (Аристотель).

Тема 2. Атомисты древности.

Тема 3. Элементы кинематики в астрономических трудах Аристарха, Птолемея, Бируни и др.

Тема 1. Зарождение учения о движении  
Аристотель (384 – 321 гг. до н.э.)

## Аристотель о математике и ее применении в физике

Согласно Аристотелю, математика неприменима по отношению к **большинству** свойств природных «вещей»:

«...**математик** исследует отвлеченное ..., опуская все чувственно воспринимаемое, например **тяжесть** и легкость, ... **тепло** и холод и все остальные чувственно воспринимаемые противоположности, и оставляет **только количественное и непрерывное**, у одних – в одном измерении, у других – в двух, у третьих – в трех, и рассматривает свойства их, поскольку они количество и непрерывное, а не с какой-либо другой стороны...»

*Метафизика XI 3 1061a29 – 35*

Иными словами, на природные «вещи» математик смотрит с точки зрения их пространственных параметров – величин линий, поверхностей и тел. Качественные характеристики, к которым относятся тяжесть, теплота и др., лежат вне сферы количества, и поэтому количество сказывается о них «несобственным образом» (см. след. слайд).

Отсюда вытекают те ограничения, которые Аристотель накладывает на применение математики к описанию природы, включая ее изменение и движение.

## Аристотель о количественном описании «вещей» и явлений

Согласно Аристотелю, (непрерывное) **количество** сказывается **собственным образом** только о четырех «вещах» – линиях, поверхностях, телах и времени. Количественные описания всех прочих «вещей» носят несобственный (**привходящий**) характер:

«Количеством **в собственном смысле** называется только то, что указано выше (линии, поверхности, тела и время – *Е.З.*); все остальное называется так **привходящим образом**; так, *белое* называется *большим*, потому что поверхность большая, и **действие** – *продолжительным*, потому что оно совершается долгое **время**, и точно так же **движение** – *значительным*: каждое из них называется количеством не само по себе. Так, если кто-то указывает, сколь продолжительно **действие**, он определит его **временем**, указывая, что это действие длится год или что-то в этом роде ...» (Аристотель, *Категории*, VI 5a37 – b 7).

Количество можно приписывать некоторым качествам – теплоту, тяжелому, быстрому (имеющих противоположные свойства – холодное, легкое и медленное), однако количество сказывается об этих «вещах» несобственным (привходящим) образом. Оно не отражает сущностных свойств этих феноменов.

Их сущность (в частности, сущность движения) может быть выявлена только посредством качественного анализа.

## Новое время

### Революция в оценке математических методов в естествознании

Точка зрения Аристотеля противоположна позиции творцов науки Нового времени.

Эта позиция представлена, например, в следующем высказывании Иммануила Канта (1724-1804):

«Я утверждаю, что в каждом из отдельных учений о природе можно встретить лишь столько настоящей науки, сколько в нем встречается математики».

И. Кант, *«Начальные метафизические основания естествознания»*  
(A VIII)

## Четыре вида движения (по Аристотелю)

1. Движение в категории **места** (или «движение по месту») – пространственное перемещение вещи. Оно может быть прямолинейным, круговым или смешанным.
2. Движение в категории **качества** – изменение свойств вещи, их усиление и ослабление (в средние века использовались термины «интенсия» и «ремиссия» качеств).
3. Движение в категории **количества** – увеличение или уменьшение в размерах (например, рост живого организма).
4. Движение в категории **субстанции** – возникновение и уничтожение вещей (субстанциальное изменение).

Особая роль движения «по месту». Она заключается в том, что прочие виды движения обязательно сопровождаются пространственным перемещением. Движение «по месту» является необходимым условием других движений.

**Один из двух примеров,  
в котором математика все же применяется для описания движения**

Это – насильственное движение, в котором фигурируют две величины:

- расстояние, пройденное телом под действием силы,
- время, затраченное на движение.

Пусть некоторый «двигатель» А действует на тело В, перемещая его за время D на расстояние G. «... Результатом движения будет некое **количество** (т.е. расстояние), пройденное в [определенное] **количество** времени...».

Тогда верны следующие соотношения:

(i) А продвинет *половину* В за время D на расстояние 2G, а за *половину* времени D – на расстояние G;

(ii) *половина* А продвинет *половину* В за время D на расстояние G.

«Такова будет пропорция».

Обобщая, имеем: скорость движения (**v**) пропорциональна движущей силе (**F**) и обратно пропорциональна силе сопротивления (**R**), определяемой размером (весом) тела. В современных обозначениях:

$$v \sim F \quad \text{и} \quad v \sim 1/R$$



# Средневековая иллюстрация

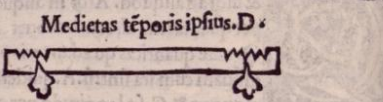
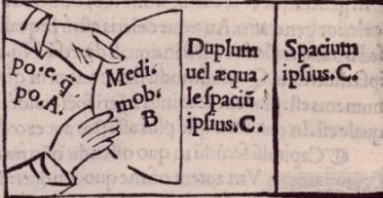
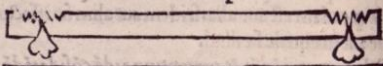
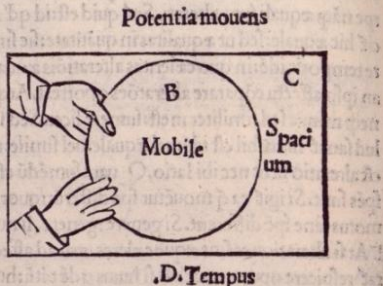
## Liber septimus Philosophorum

uebit idē. B. totū i. D. tpe: aut in eius aliqua parte per aliquam. C. spacii pte quæ rationem eandem ad totum habebit. C. quam. F. pars uel quæuis alia ad totam. A. potentiam habet. Omnino enim si forte fuerit nullam partem mouebit. Non enim si tota uires quippiam per tantum mouerūt spacium: dimidium ipsa: per quatumuis spacii quouis in tempore idem mouebit. Nam unus eam trahet profecto nauim: quā centum traxere si uires eorum tam in ipsorum numerum: q̄ in spacii diuidantur partes: q̄ nauim omnes simul traxere. Quapropter zenonis ratio non est uera: quæ cōcludit quāuis partem mili facere sonum. Nihil enim prohibet: ut nullo in tempore eum moueat aerem: quem totum modius mouit cum cæcidisset. Neq; pars si per se fuerit id mouebit: quod una cum toto mouere potest neq; est enim pars ulla nisi potentia in toto.

38 Si uero duo quædam seorsum per tantum spacium tātō in tempore duo seorsum pondera mouent: & composita per longitudinem æqualem æqualiue in tempore compositum ex ponderibus utrisq; mouebunt. Est enim in eis eadem ratio.

39 Sunt ne igitur eadem & in alteratio ne atq; accretio. Est enim aliquid id quod auget: & id etiam quod augetur atq; in tempore tanto & tantū. aliud auget: aliud augetur. Et id quod alterat: & quod alterat similiter est aliquid & tantū intensio remissione ue est alteratum: & i tempore tanto. In duplo duplum: & duplum in duplo. Dimidium autem in dimidio temporis aut in dimidio dimidium: aut in equali duplum. Si uero id quod alterat aut auget: tantum in tanto auget aut alterat non necesse est & dimidium in dimi-

Demōstratio oñdes q̄ si aliqua potētia mouet aliqd mobile p aliqd spacii i aliquo tēpore: medietatem illius mobilis mouebit eadē uel æqualis potentia per duplum spacium i eodem tempore: uel per idem spacium: in medietate temporis.



Demōstratio ostendens q̄ si aliq̄ potentia mouet aliquod mobile per aliqd spacium i aliquo tpe. Dimidiata potētia: medietatē mobilis mouebit per idē spacium in eodē tpe.

## Tractatus primus

dio & i dimidio dimidiū alterare uel augere. Sed nihil si forte fuerit alterabit uel augetur quemadmodū & in pondere.

Explicit liber septimus.

Incipit liber octauus philosophorū Aristotelis de primo motore: & primo moto: & primo mobili.

Tractatus primus in quo præmittit motū esse sempiternum.

Capitulum primum in quo ostendit secundum suā opinionē motus sempiternitatē.



Tortus ne aliquis est motus antea: non erat: rursusq; adeo corruptus: ut nihil penitus moueat: an neq; factus ē neq; corruptus sed ipse erat: & ipse erit. Atq; hoc hisce q̄ sūt i mortale ac ineffabile est quasi sit uita quædam is uniuersis q̄ natura cōstat. Motū igitur ois inquit esse: qui de natura aliqd dicunt: tū q̄a mūdū faciūt: tū q̄a cōtēplatio ipsius ois ē de gnatioe corruptione: quā ipse sibile est eē: si nō sit motus: uerū q̄ mūdōs infinitos eē: & alios ipso fieri: alios corrupti dicūt: i motū inquit semp eē. Sint enī gnatioes & corruptiones ipsorū: cū motu necesse est. Quæ uero mūdū aut unū & ipse eū de eē dicūt: aut unū quidē sed non semp: i de motu quoq; similiter opinantur.

- Si igitur cōtingit aliquis nihil moueri dupliciter. id accidere necesse est. Aut. n. ut Anaxagoras cenlet. Dicit enim cū oia simul essent atq; q̄serent: tpe infinito mentem mouisse ac segregasse. Aut ut Empedocles dicit interdū res moueri: interdū quiescere. Moueri quidē: cū aut unū ex multis cōcordia: aut ex uno multa discordia facit. Quiescere uero in hisce tpe quæ inter hæc media cadūt. Dicit enim hoc mō. Nā quo de multis nasci cōsueuerit unū. Atq; iterū ex uno gnato plura renasci. Hoc sūt: fixūq; sibi nō pmāet æuū. At quo mutātur nunq̄ cessante recurſu. Hoc sic ppetuo stabilem uersantur in orbem. Cū enim dicit. At quo mutāt nūq̄ cessante recurſu: id empedoclem arbitrandum est intel- tigare: hic in quā illuc & illinc huc fieri motum.
- Cōsiderandū est igitur de hoc quonā mō se habet. Est enim opere p̄ciū hanc perspice re ueritatem: & non solum ad naturalem cōtēplatiōem sed & ad eam doctrinam quæ circa principium primum uersatur uehementer conducit.
- Ex his autem ordiemur: quæ prius a nobis in libris naturalis scientiæ sunt definita. Dicitur itaq; motū ipsius mobilis hoc actum esse: quo mobile est. necesse est ergo res ens esse: quæ uno quoq; motu moueri possunt & sine definitione etiam motus quouis profecto fatēbitur necessarium esse id moueri quod singulis motibus moueri potest: ceu alterari quidem id quod est alterabile: ferri autem id quod loco mutabile est. Quare sit antea cōbustibile q̄ cōburatur: & combustum antea q̄ comburatur oportet.
- Igitur & hæc ipsa necesse est aut si non erant aliquando facta esse: aut perpetua esse.
- Si igitur unum quodq; mobilium ac motiuorū est factum: necesse est ante motum acceptum aliam mutationem motumq; fuisse. Quo quidem ortum id est: quod aut mo-

## Границы применимости закона пропорциональности

Продолжение фрагмента:

«Неверно, что при уменьшении двигателя (т.е. движущей силы) наполовину происходит удвоение времени движения, ибо «может случиться, что **никакого** движения не будет. Ведь из того, что целая сила продвинула [тело] на определенную длину, не следует, что половина силы продвинет [это же тело] на сколько-нибудь в какое бы то ни было время; иначе один человек мог бы двигать судно, если только силу волочильщиков и длину, на которую они все двигали его, разделить на их число».

[В русском переводе вместо «силу волочильщиков» стоит «силу гребцов». Это ошибка. Аристотель имеет в виду вытаскивание тяжелой триеры на берег].

Смысл фрагмента: при кратном уменьшении движущей силы пропорция  $v \sim F$  нарушается.

Если сила движения равна  $F/2$ , то отсюда не следует, что скорость равна  $v/2$ .

## Второй фрагмент, в котором математика применяется для описания движения

Рассматривается вопрос о падении тяжелого тела (естественное движение).

Аристотель доказывает, что падение тела, лишенного тяжести, невозможно.

Доказательство ведется от противного:

«Пусть **A** будет [тело], лишенное тяжести, **B** – [тело], имеющее тяжесть.

Допустим, что лишенное тяжести прошло расстояние **GD**, а **B** в равное время – расстояние **GE**, [которое будет больше], так как имеющее тяжесть пройдет большее расстояние. Стало быть, если тело, имеющее тяжесть, разделить в той же пропорции, в какой **GE** стоит к **GD** ..., то, раз все [тело] проходит все расстояние **GE**, [указанная] часть по необходимости должна проходить в равное время расстояние **GD**, откуда следует, что [тело], лишенное тяжести, и [тело], имеющее тяжесть, [в равное время] пройдут равное расстояние, а это невозможно».

(«О небе», III 2 300a 25 – 301b 1).

## Второй фрагмент, в котором математика применяется для описания движения

### Вывод:

В этом фрагменте Аристотель исходит из того, что скорость падения тела ( $v$ ) пропорциональна его тяжести ( $F$ ):  $v \sim F$

В отличие от насильственного движения, здесь любое кратное изменение тяжести тела ( $F$ ) – будь то увеличение, или уменьшение – ведет к кратному изменению скорости его падения ( $v$ ).

Каким бы малым весом ни обладало тело, оно все равно будет падать вниз.

В других фрагментах, посвященных падению тяжелых тел, Аристотель также говорит о том, что скорость падающего тела прямо пропорциональна его тяжести и обратно пропорциональна плотности среды.

## Причина продолжающегося движения брошенного тела

### *Метафизические постулаты теории движения Аристотеля*

1. Всё, что движется, должно двигаться чем-то другим (кроме живых существ).
2. Движимое и двигатель должны находиться в непосредственном контакте.

Возникает вопрос: как возможно движение брошенного тела, которое в момент броска утрачивает контакт с «двигателем» - рукой или тетивой лука?

«А что касается перемещающихся [предметов], будет хорошо сначала разобрать одну трудность. Раз всякий движущийся [предмет], который не движет сам себя, приводится в движение чем-нибудь иным, то спрашивается: как некоторые [предметы] движутся непрерывно без соприкосновения с движущим, например [тела] брошенные? ...

[Ответ:] Необходимо ... сказать, что первое [движущее] может сообщить двигательную способность или обладающему такими свойствами воздуху, или воде, или чему-нибудь иному, что по природе способно двигать или находиться в движении».

(«Физика» VIII 10 266b 27 – 267a 20)

В этом фрагменте Аристотель придерживается тезиса о том, что силой, приводящей в движение брошенное тело (камень, стрела из лука), является среда – воздух или вода. Среда играет двойственную роль: она не только сопротивляется движению, но и активно поддерживает его.

## **«Брошенное тело движется воздухом»**

### **(подробности одной из теорий движения брошенного тела по Аристотелю)**

Основной «двигатель» (рука или тетива лука) приводит в движение ближайший к нему слой воздуха. Воздух при этом претерпевает действие внешней силы, т.е. находится в пассивном модусе. Одновременно он находится и в активном модусе, ибо двигатель, приведя воздух в движение, передает ему способность (силу, энергию) передвигать следующий прилегающий к нему слой воздуха, толкая его перед собой. Таким образом, приведенный в движение слой воздуха действует на другой, смежный с ним, тот – на третий и т.д. Образуется своего рода воздушная волна, которая толкает тело, заставляя его двигаться в направлении, заданном основным «двигателем».

При передаче движения от одного слоя воздуха к другому общее усилие ослабевает, так что в итоге воздух и движимое им тело останавливаются:

«[Движение] прекращается, когда у смежного тела способность движения становятся меньше и меньше: окончательно же прекращается, когда не будет действовать предыдущий двигатель, а только то, что было [им] приведено в движение; они необходимо останавливаются вместе: движущее, движимое и все движение».

## **Тема 2. Атомисты древности**

## **Аристотель о противоположности двух натурфилософских теорий, трактующих о непрерывности или дискретности мира.**

Аристотель:

«... в силу одних и тех же оснований и величина, и время, и движения слагаются из неделимых частей и делятся на них, или, наоборот, не слагаются и не делятся» («Физика» VI 1, 231b). «Вследствие непрерывности величины непрерывно и движение, а через движение и время» («Физика» IV 11, 219a).

Иными словами, по Аристотелю, есть две логически возможные теории, описывающие мир. Одна из них последовательно континуалистская, исходит из одновременной непрерывности величин, движения и времени. Это теория самого Аристотеля. Другая исходит из одновременной дискретности величин, движения и времени. Это теория древнегреческих атомистов.

Основные представители античного атомизма – Левкипп (V в. до н.э.), Демокрит (ок. 460 – ок. 370 до н. э.), Эпикур (341 –270 до н.э.).



## Учение атомистов

Рубенс. Демокрит – смеющийся философ (1603)



Мир состоит из атомов (неделимых частиц) и пустоты, в которой эти частицы постоянно движутся. Атомы различаются по форме и величине, но состоят из одного вещества. Причиной движения атомов, его первоначальной «силой» является устремление «подобного к подобному» (анимизм – представление об одушевленности природы).

«И животные соединяются в стаи с однородными животными, например, голуби с голубями, журавли с журавлями; то же наблюдается и у других животных. Так же обстоит и с неживой природой, что можно видеть при просеивании зерен и на камнях морского прибоя; в первом случае при сотрясении сита располагаются отдельно чечевица с чечевицей, ячмень с ячменем, пшеница с пшеницей; во втором случае, благодаря движению волн, продолговатые камешки отталкиваются в то же место, куда и другие продолговатые, круглые – куда круглые...» (Секст Эмпирик о концепции движения атомистов).

Атомы одной формы стремятся соединиться с себе подобными.

## Лукреций Кар «О природе вещей» (около 99 — 55 до н.э.)

«Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает  
В наши жилища и мрак прорезает своими лучами,  
Множество маленьких тел в пустоте ты увидишь; мелькая,  
Мечутся взад и вперед, в лучистом сиянии света;  
Будто бы в вечной борьбе они бьются в сраженьях и битвах,  
В схватки бросаются вдруг по отрядам, не зная покоя,  
Или сходясь или врозь постоянно опять разлетаясь.  
Можешь из этого ты уяснить себе, как неустанно  
Первоначала вещей в пустоте необъятной мнутя.  
Так о великих вещах помогают составить понятие  
Малые вещи, пути намечая для их постижения».

Представление об атомах, неразличимых глазом вследствие малости, и их движении в пустоте можно, таким образом, получить, наблюдая за движением пылинок в солнечном свете.

## Лукреций Кар: О постоянстве скорости при движении атомов в пустоте

«... никогда никакую нигде не способна  
Вещь задержать пустота и явиться какой-то опорой,  
В силу природы своей постоянно всему уступая.  
Должно поэтому всё, проносясь в пустоте без препятствий,  
Равную скорость иметь, несмотря на различие в весе».

## Атомистика древних греков

Атомистика древних греков была не только физической атомистикой, т.е. учением о природных движениях. В не меньшей степени она была способна объяснять сложнейшие физиологические явления, деятельность органов чувств и в конечном счете процессы человеческого познания. Учение о материальных «истечениях» позволяло свести зрение к непосредственному соприкосновению, «осязанию» далеких предметов.

В целом античный атомизм является разновидностью механицизма – учения, согласно которому устройство целой вещи или явления сводимо к комбинации ее частей и их движений. Подобно тому, как сложная машина может быть понята как совокупность своих движущихся частей, так и мир в целом предстает в виде грандиозной «машины».

«Целое равно механической сумме своих частей»

Этот аспект античного атомизма оказал влияние на становление механистических философий Нового времени.

Даже те мыслители XVII в., которые не были атомистами (например, Декарт), испытали влияние этой идеи.

Тема 3. Элементы кинематики в астрономических трудах  
Аристарха, Птолемея, Бируни и др.

## Три модели античной астрономии

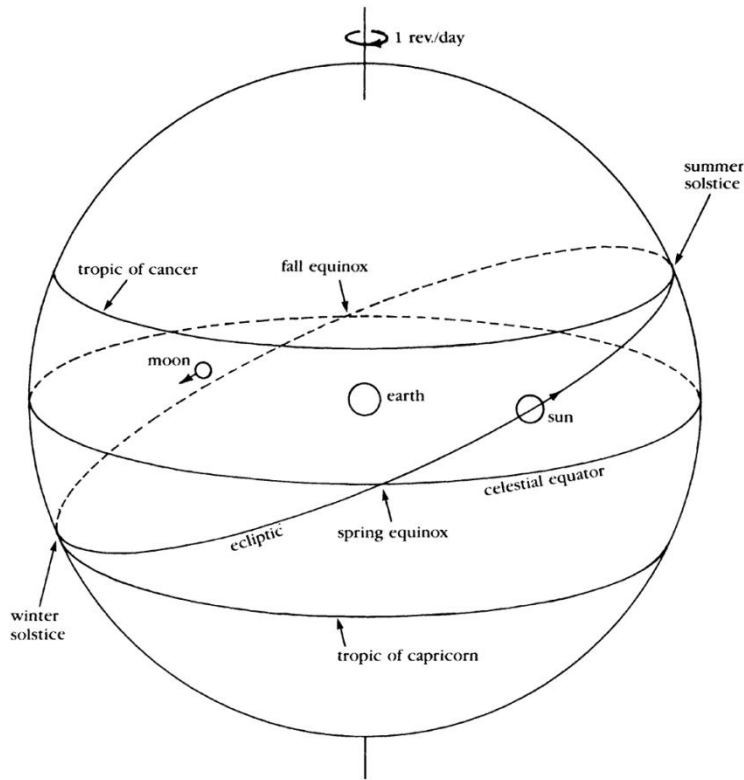
Модель Евдокса-Аристотеля (IV в. до н.э.) – сводит движение планет к вращению сфер, к которым они жестко прикреплены («как гвозди на ободу колеса»). Эта модель трехмерная. Она глобальная, в том смысле, что предлагает механизм, описывающий совместное движение всех планет сразу.

Модель Птолемея – объясняет движение планет при помощи композиции движений по окружности. Эта модель двумерная (окружности лежат в одной плоскости). Модель описывает движение вокруг Земли каждой из планет отдельно (а также Луны и Солнца). Модель является кинематической – вопрос о характере движущих сил в ней не отражен.

Модель-метафора «Планеты на небе, как птицы в воздухе или рыбы в воде» (восходит к Птолемею). Исходит из наличия у планет собственной движущей силы. Кроме того, она предполагает наличие «жидкой» (или воздушной, проницаемой) среды, сквозь которую движутся небесные тела.

# Начальный этап. Модель «двух сфер».

Евдокс Книдский (ок. 390 - ок. 337 до н. э.).

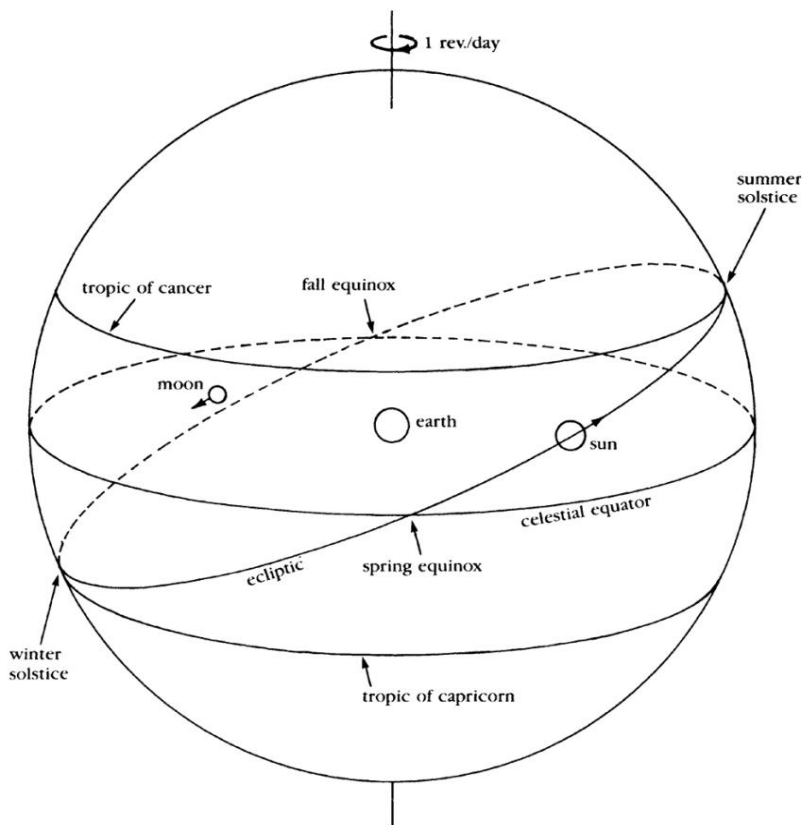


В модели «двух сфер небо и Земля представлены парой концентрических сфер. К небесной сфере прикреплены звезды, а по ее поверхности движутся Солнце, Луна и пять планет. Суточное вращение небесной сферы объясняет наблюдаемые ежедневно восходы и заходы небесных тел.

Сфера Земли находится в центре, она неподвижна. Небесная сфера вращается вокруг вертикальной оси, делая один оборот в сутки. Земной экватор, спроецированный на небесную сферу, определяет небесный экватор. Годовой путь Солнца по небесной сфере – окружность, наклоненная под углом  $23^\circ$  к экватору (эклиптика). Эклиптика и небесный экватор пересекаются в точках равноденствия. Точки, в которых эклиптика наиболее удалена от экватора, соответствуют летнему и зимнему солнцестоянию. Окружности, проведенные параллельно экватору в точках летнего и зимнего солнцестояния называются тропиками Рака и Козерога.

## Модель «двух сфер»

В модели «двух сфер» период обращения Солнца по эклиптике составляет год, в то время как Луна совершает свой оборот за месяц. Ее движение вдоль эклиптики почти равномерно.

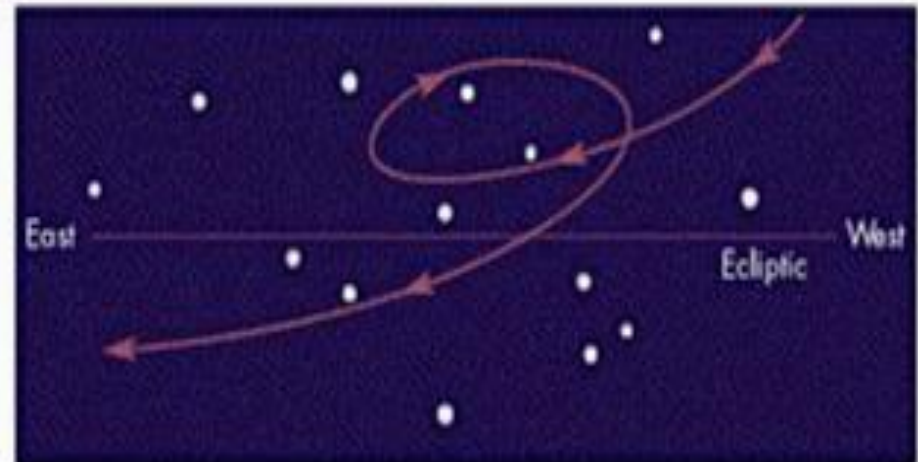
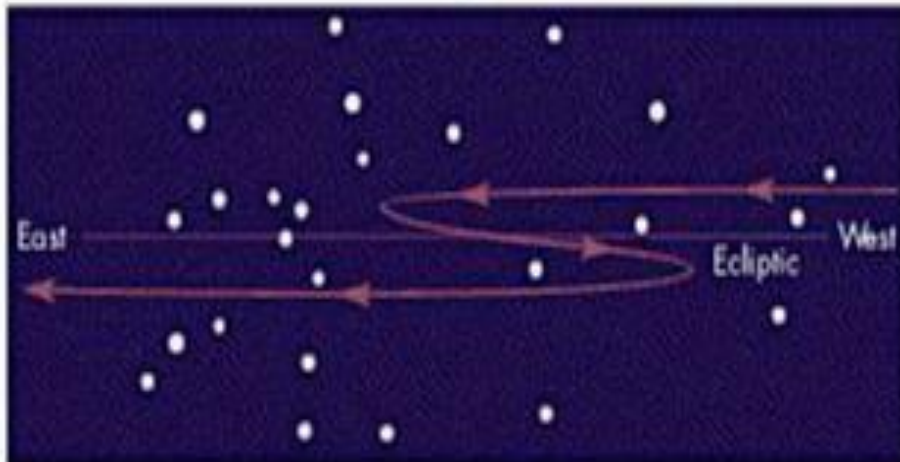
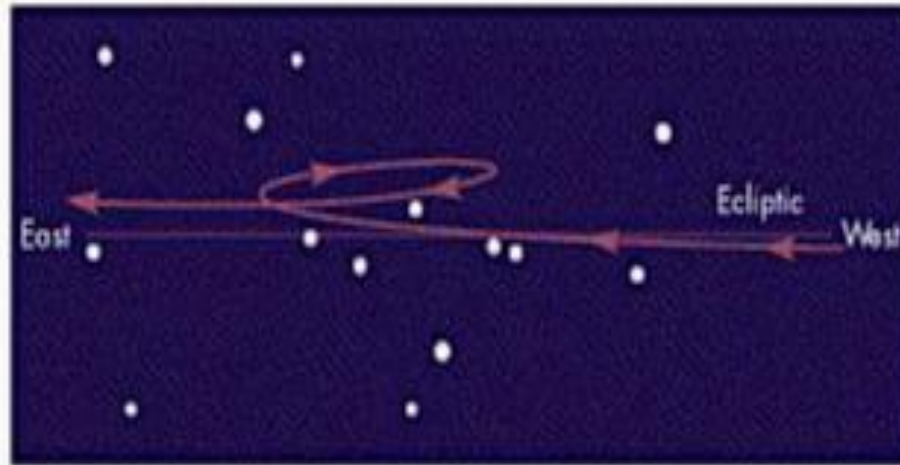


Планеты – Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн – также следуют вдоль эклиптики, отклоняясь от нее не более нескольких градусов в том же направлении, что и Солнце и Луна, но со значительными колебаниями скорости.

Марс, например, делает один оборот вокруг Солнца за 22 месяца.



Основная проблема астрономии – ретроградное (попятное) движение планет. При движении планеты периодически останавливаются и меняют направление движения на обратное; потом снова останавливаются и возобновляет обычное движение вдоль эклиптики. Такое изменение направления называется «ретроградным движением», оно свойственно всем планетам, кроме Солнца и Луны.



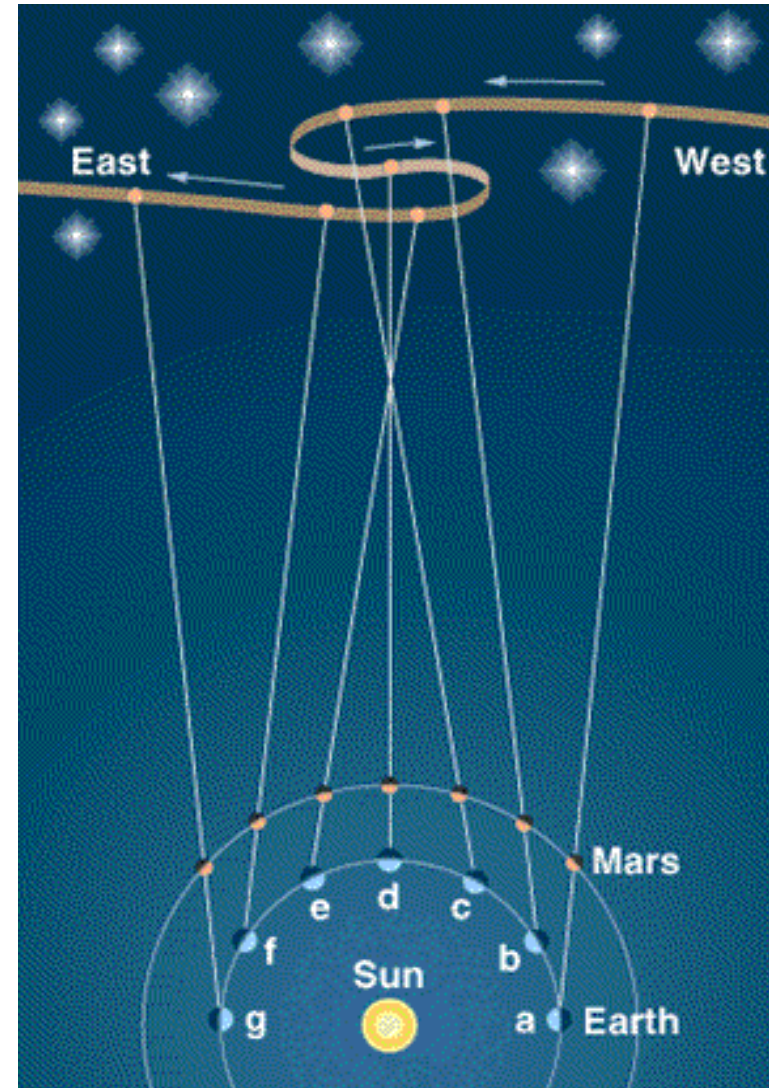
## Основная проблема астрономии - ретроградное движение планет (на примере Марса)

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).

Период обращения Марса вокруг Солнца – 26 месяцев.

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



## «Спасение феноменов»

Общее основание всех астрономических теорий античности – методологический «постулат», приписываемый Платону (IV в. до н.э.):

Движение небесных тел должно быть описано при помощи простейших движений, состоящих из равномерных перемещений по окружности.

«Постулат» Платона включает два пункта.

1. Движения небесных тел состоят из комбинаций движений по окружности
2. Скорости этих круговых движений перемещения по ним – постоянны.

Точная цитата (Симпликий, VI в. н.э.):

«Платон формулирует принцип кругового, равномерного и постоянного правильного движения небесных тел (т.е. движения, осуществляющегося в одном направлении). 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 феномены (видимые образы) движения планет?»

\*) осуществляющегося в одном направлении

## Механическая модель Евдокса –Аристотеля

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

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

Движение сфер происходит под действием реальных физических сил. Эти силы имеют, однако, одушевленный характер.

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

Кроме того, она с трудом согласуется с данными астрономических наблюдениями.

# Механическая модель Евдокса-Аристотеля (фрагменты)

Схема движения одной планеты

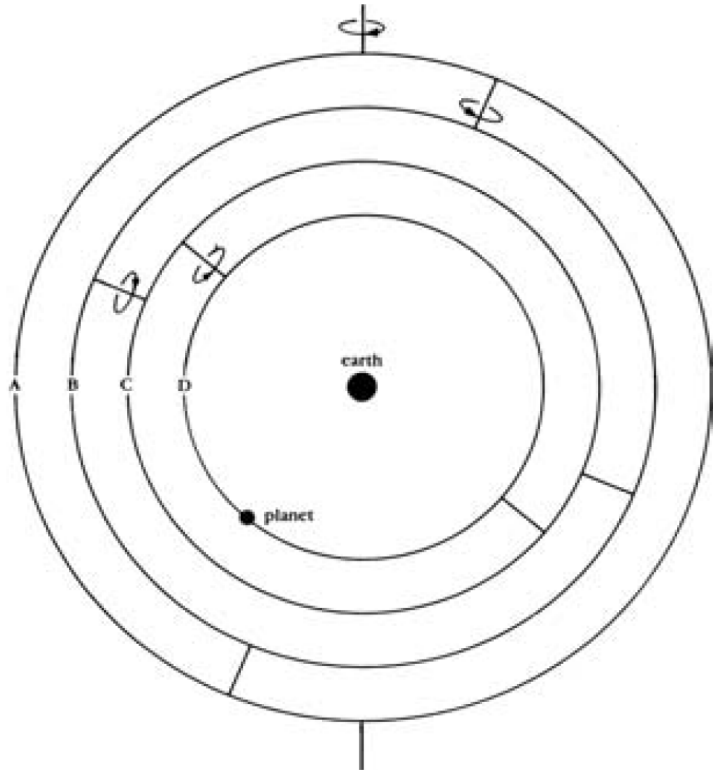
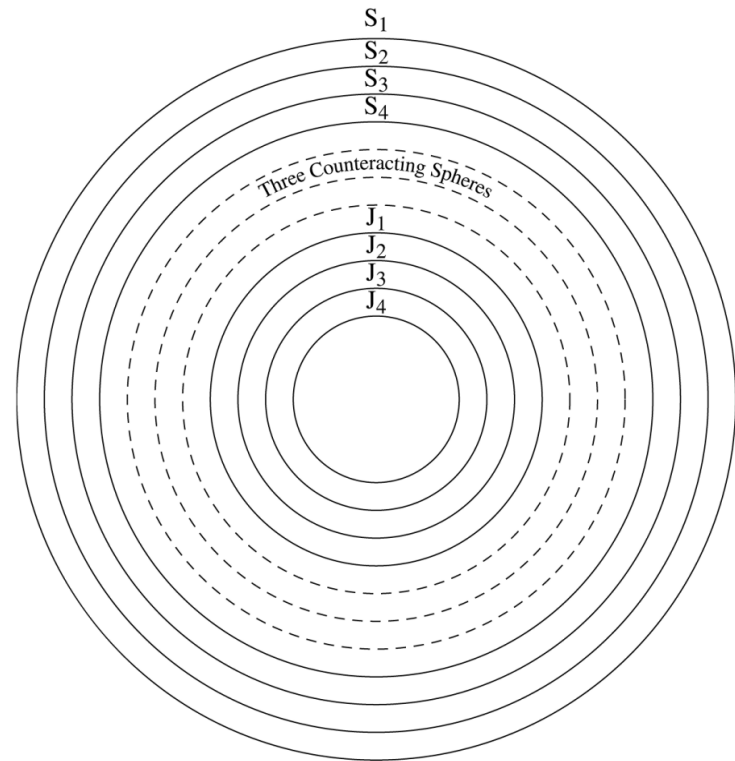
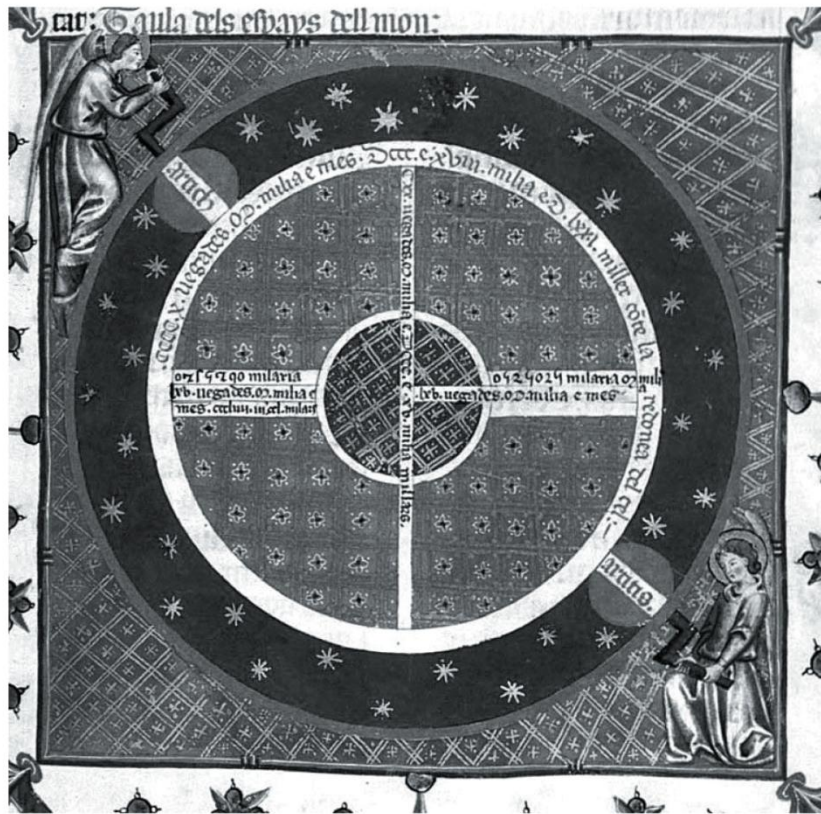


Схема движения двух соседних планет (Сатурн - Юпитер)



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



Кинематическая модель  
Клавдий Птолемей

## Позднеантичная астрономия. Модели Птолемея (II в. н.э)

Клавдий Птолемей (ок. 100 – ок. 170 ) – астроном эпохи позднего эллинизма; работал в Александрии. Птолемей жил примерно через пятьсот лет после Евдокса. В своей работе он использовал теоретические достижения, достигнутые греками в течение прошедших столетий. Кроме того, он имел доступ к астрономическим наблюдениям, как греческим, так и вавилонским, проводившимся в течении этого времени. Даже относительно грубые данные, полученные из наблюдений за достаточно большой промежуток времени, полезны для теоретических выводов.

Благодаря Птолемею в планетарной астрономии стали использовать сложные математические методы, которых Евдокс еще не знал. Создавая свои модели, Птолемей преследовал ту же цель, что и Евдокс – найти комбинацию круговых движений, которые могли бы объяснить движение планет. Взяв за основу равномерное круговое движение, Птолемей, в отличие от Евдокса и Аристотеля, относил его не к сферам, а к окружностям.

Основное произведение Птолемея «Великое математическое построение по астрономии в тринадцати книгах» или «Альмагест» (араб.).



## Модели Птолемея

- Модель с эксцентрикой – объяснение видимых неравномерностей движения Луны и Солнца при помощи равномерного движения по окружности специального вида
- Модель с деферентом и эпициклом – объяснение ретроградного движения планет при помощи композиции двух равномерных движений по специально подобранным окружностям
- Модель экванта – объяснение нерегулярного движения планет при помощи неравномерного движения центра эпицикла по окружности. Это движение имеет постоянную угловую скорость по отношению к специальной «уравнивающей» точке (*punctum aequans*), отличной от центра деферента и центра Земли.

Модель с эксцентрикой: объясняет видимые неравномерности движения небесных тел в условиях равномерного вращения по окружности

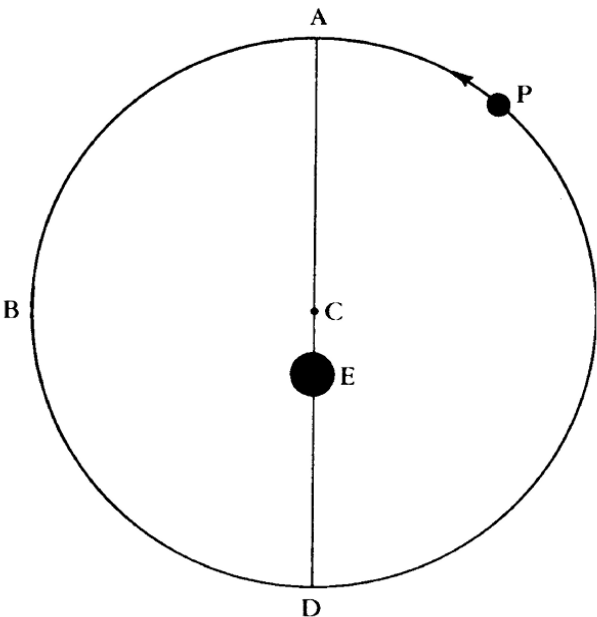
Окружность ABD с центром С – орбита планеты Р.

Если Земля находится в центре, а планета движется по окружности с постоянной угловой скоростью, то для наблюдателя на Земле движение планеты будет равномерным.

Если же Земля находится в точке Е, не совпадающей с центром окружности, то для наблюдателя на Земле движение планеты будет неравномерным. При приближении к точке А оно будет замедляться, а к D –ускоряться.

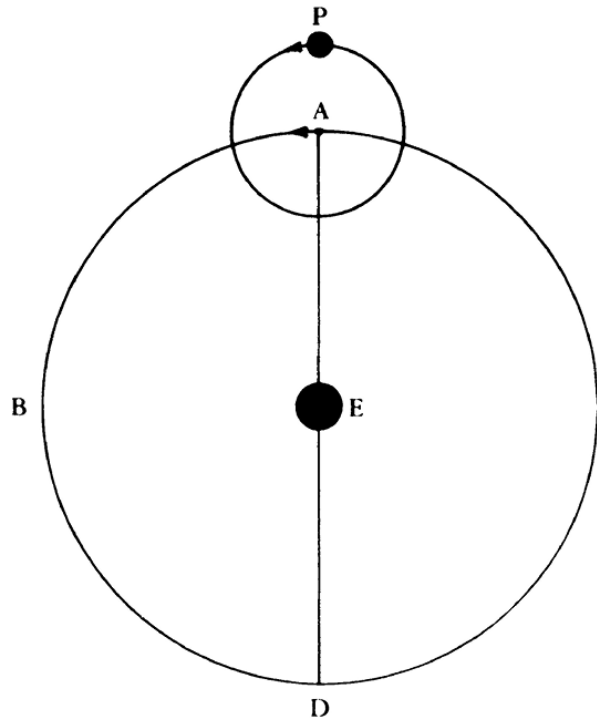
Модель с эксцентрикой Птолемею использовал для простых случаев неравномерного движения: Луны и Солнца вдоль эклиптики (объясняющего неравномерность распределения времен года).

Для движения планет он применял другую модель, основанную на деферентах и эпициклах. В этой модели использовалось также понятие экванта (punctum aequans).



## Модель с деферентом и эпициклом

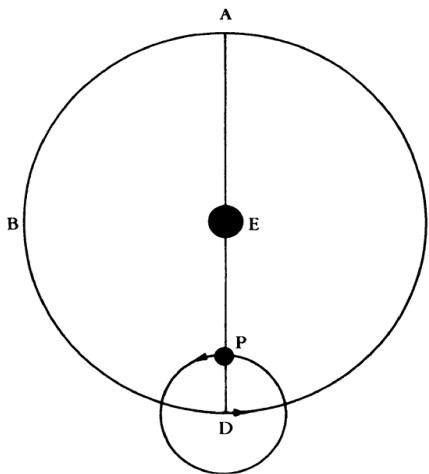
Окружность ABD с центром в точке E, в которой находится Земля, называется деферентом (лат. *deferens* — несущая или отклоняющая). Небольшая окружность с центром в точке A, расположенным на «отклоняющей» окружности, называется эпициклом.



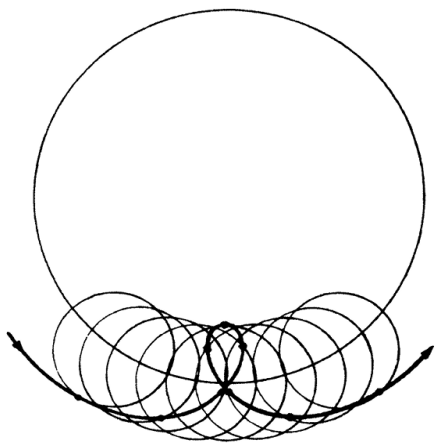
Планета P равномерно движется против часовой стрелки по эпициклу; одновременно центр эпицикла равномерно движется против часовой стрелки по окружности деферента. Наблюдатель, находящийся на Земле, видит сложное движение, составленное из двух равномерных круговых движений. Точные характеристики этого движения зависят от конкретных значений — относительных размеров окружностей, скорости и направления движения.

Когда планета P находится за пределами деферента, ее видимое движение будет суммой движений — вокруг эпицикла и эпицикла вокруг деферента; в этот момент планета будет иметь максимальную скорость.

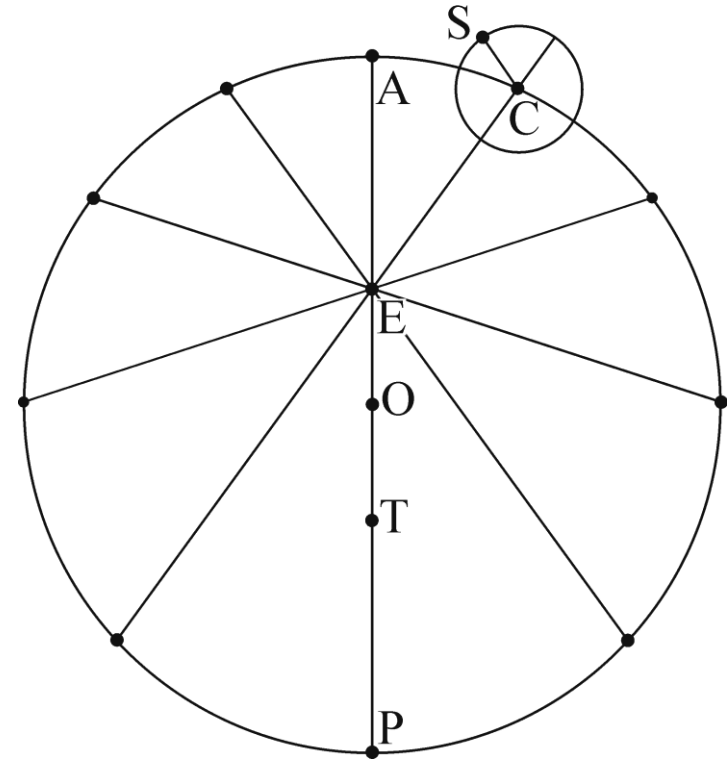
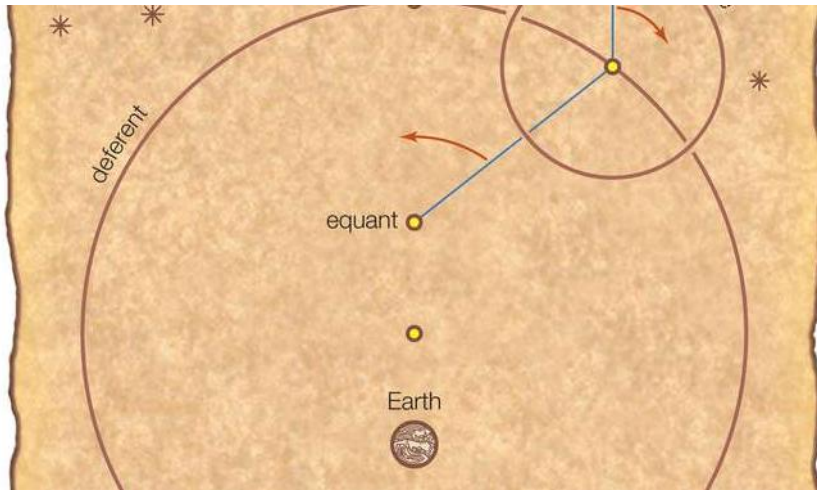
## Модель с деферентом и эпициклом – объяснение ретроградного движения



Когда P находится внутри деферента, его движение по эпициклу и движение эпицикла по деференту противоположны (если смотреть с Земли). Видимое движение планеты определяется разностью скоростей этих движений. Если скорость движения P по эпициклу будет больше скорости движения центра эпицикла по деференту, то планета будет казаться разворачивающейся вспять: для нее наступит фаза ретроградного движения.



# Сложная модель: вращение деферента с постоянной угловой скоростью вокруг экванта



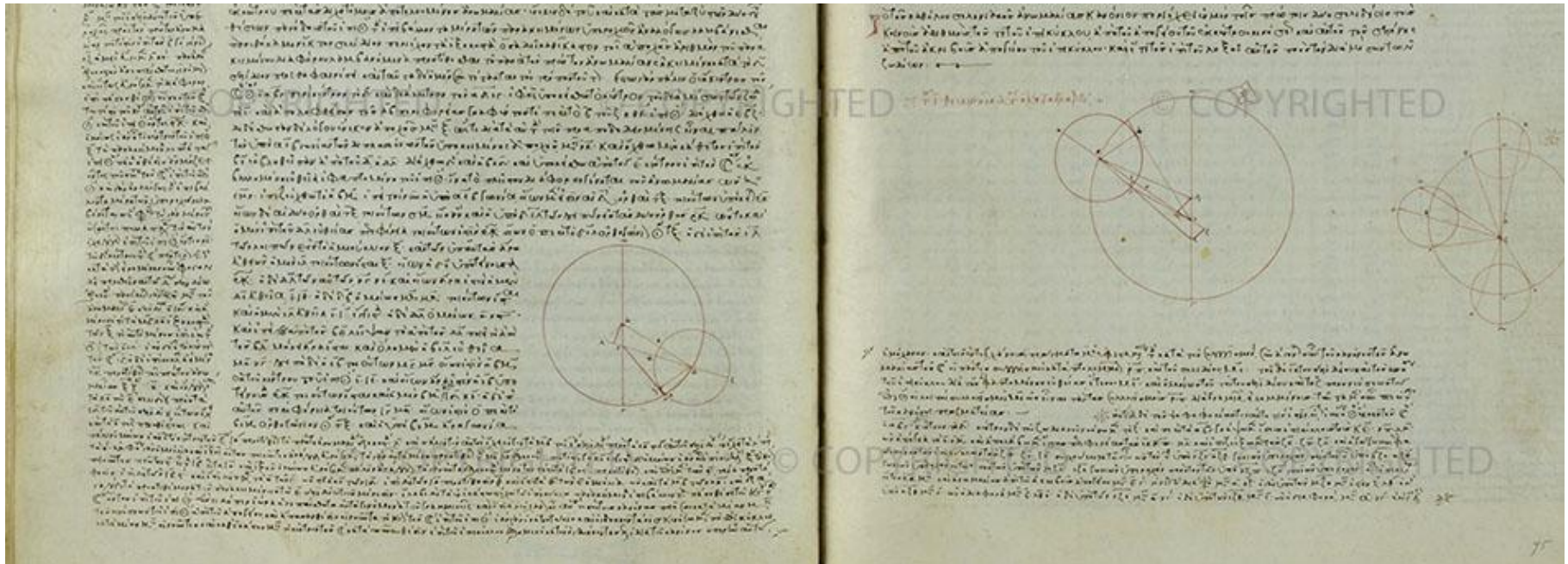
Точки на окружности показывают положения планеты через равные промежутки времени.

О — центр деферента, Т — Земля, Е — точка экванта, А — апогей деферента, Р — перигей деферента, С — центр эпицикла, S — планета, .

$$TO = EO$$

# Almagest, early 14th century

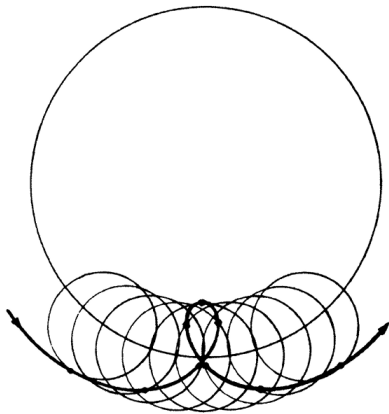
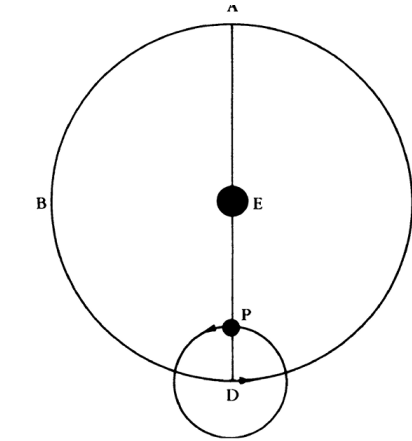
Florence, Biblioteca Medicea Laurenziana, Plut. 28.1, ff. 74v-75r  
Epicycles and eccentrics are depicted on folios 74v-75r.



## «Спасение феноменов»

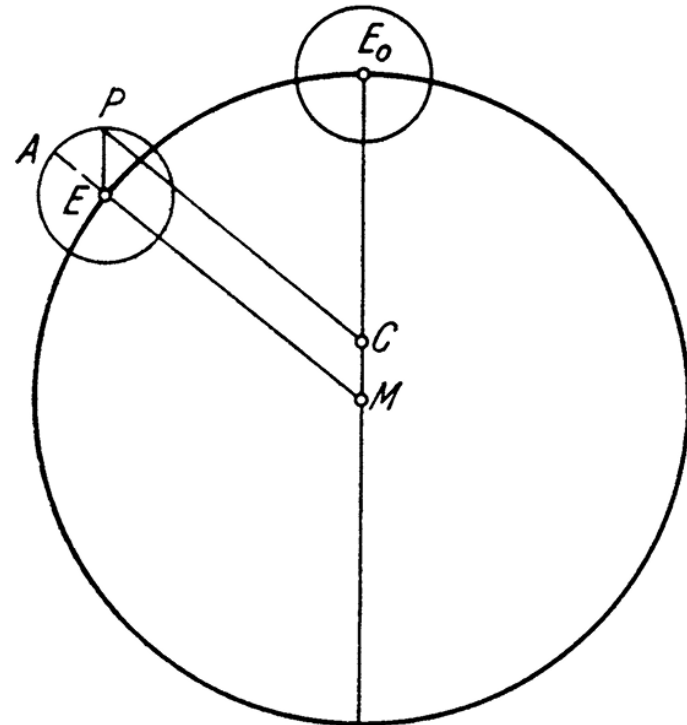
### Эквивалентность двух кинематических моделей (эпициклов и эксцентрик)

Совместное движение деферента и эпицикла

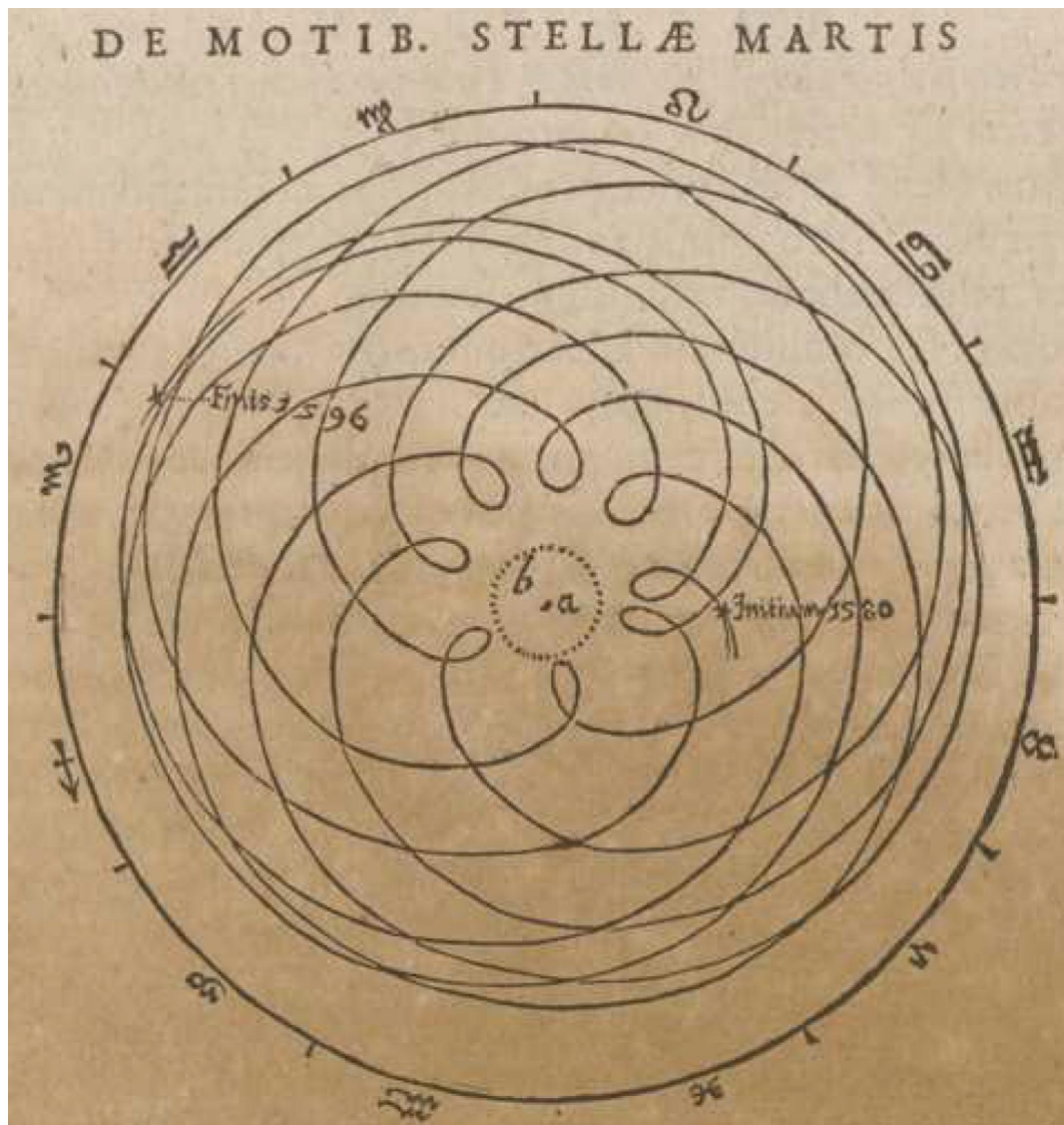


Если эпицикл  $E$  обращается с той же угловой скоростью, что и деферент  $M$ , но в противоположном направлении, то совокупное движение совпадает с движением с эксцентрикой в т.  $C$ .

Задание: доказать!



Первый рисунок планетной траектории  
Траектория движения Марса (за период 1580 – 1596; 8 петель).  
J. Kepler. Astronomia nova (1608) (р. 4)





## Аристарх Самосский (ок. 310-230 до н.э.)

1. Основное сочинение «Об определении величин и расстояний Солнца, Луны и Земли».
2. По-видимому, являлся автором кинематической системы с эксцентрикой.
3. Аристарх – создатель гелиоцентрической системы мира.

Аристарх Самосский.

«Об определении величин и расстояний Солнца, Луны и Земли»

«Так как лунные затмения происходят в то время, когда Земля находится на одной линии с Солнцем и Луной, то Луна попадает в тень, отбрасываемую Землей. Проведем конус общих касательных к сферам Солнца и Земли и определим, с какой стороны будет находиться вершина этого конуса. Зная продолжительность полного затмения, можно вычислить величину диаметра земной тени на расстоянии Луны; он оказывается меньше диаметра Земли. Это значит, что вершина конуса земной тени лежит в той же стороне от Земли, что и Луна; следовательно, диаметр Солнца больше диаметра Земли.

Это и было установлено Аристархом...; причем из текста можно установить, что во время его написания Аристарх придерживался еще геоцентрических воззрений. Но если диаметр Солнца больше диаметра Земли по Аристарху примерно в семь раз, то это значит, что объем Солнца в 343 раза больше объема Земли; тогда из двух возможных предположений— геоцентрической и гелиоцентрической системы — наиболее вероятным является второе, которое и было принято Аристархом».

И.Н. Веселовский, «Очерки по истории теоретической механики» М., 1974

(с. 47-48).

## Архимед о гелиоцентрической системе мира Аристарха Самосского

Архимед: «Как ты знаешь, большинство астрономов называют миром шар, центр которого совпадает с центром Земли, а радиус равен прямой, заключающейся между центрами Солнца и Земли; это ты узнал из написанных астрономами доказательств.

Но Аристарх Самосский выпустил в свет книгу о некоторых гипотезах, из которых следует, что мир гораздо больше, чем понимают обычно. Действительно, он предполагает, что неподвижные звезды и Солнце находятся в покое, а Земля обращается вокруг Солнца по окружности круга, расположенной посередине между Солнцем и неподвижными звездами, а сфера неподвижных звезд имеет тот же центр, что и у Солнца, и так велика, что круг, по которому, как он предположил, обращается Земля, так же относится к расстоянию неподвижных звезд, как центр сферы к ее поверхности». (иными словами, мир бесконечен)

Архимед «Исчисление песчинок» («Псаммит»)

Плутарх (ок. 100 н.э.) дает схожее описание гипотезы Аристарха, специально отмечая, что Земля при перемещении вдоль эклиптики вращается вокруг своей оси.

## Архимед о гелиоцентрической системе мира Аристарха Самосского (продолжение)

Но хорошо известно, что это невозможно; так как центр сферы не имеет никакой величины, то нельзя предполагать, чтобы он имел какое-нибудь отношение к поверхности сферы.

Надо поэтому думать, что Аристарх подразумевал следующее: поскольку мы предполагаем, что Земля является как бы центром мира, то Земля к тому, что мы назвали миром, будет иметь то же отношение, какое сфера, по которой, как думает Аристарх, обращается Земля, имеет к сфере неподвижных звезд; из таких предпосылок он объясняет наблюдающиеся явления и, по-видимому, считает, что величина сферы, по которой он заставляет двигаться Землю, и будет равна тому, что мы называем миром».

Почему гелиоцентрическая система Аристарха Самосского была отвергнута

1. Религиозные соображения, сходные с теми, что лежали в основе осуждения теории Коперника в XVII веке (судьба Галилея).

Глава стоиков Клеанф обвинил Аристарха в безбожии за то, что он сдвинул с места очаг (Гестию) Вселенной.

2. Научные доводы. Основными положениями теории Аристарха были:

- (i) все планеты должны вращаться вокруг центрального материального тела;
- (ii) эти круговые вращения должны быть равномерными.

Эти два положения несовместимы. Нельзя было доказать, что вращение Земли вокруг Солнца (или Солнца вокруг Земли) равномерно.

Еще до Евдокса греческие астрономы Метон и Евктимон показали, что продолжительность астрономических времен года, т. е. промежутков от равноденствий до солнцестояний, не одинакова. Если считать, что небесные движения являются круговыми и равномерными, то нужно было отвергнуть первое положение – сместить Солнце из центра вращения.

## **Аль-Бируни (973-1048)**

Главное сочинение Бируни по астрономии — «Канон Мас'уда по астрономии и звёздам».

Значение астрономии для ислама.

Позже сделаю подробный слайд на эту тему.

Модель-метафора

«Планеты в небе как птицы в воздухе или рыбы в воде»

## Модель-метафора

«Планеты в 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»



## Модель-метафора

«Планеты в небе как птицы в воздухе или рыбы в воде»

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.

Иоганн Кеплер испытал влияние этой идеи. Движение планет он сравнивал с движением лодок, управляемых гребцами, в водном потоке.

## Модель-метафора

«Планеты в небе как птицы в воздухе или рыбы в воде»

Объективное значение этого подхода для развития астрономии

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 подчеркивает собственную активность планет.
3. Модель «как птицы в воздухе или рыбы в воде» предполагает, что небеса пронцаемы, т.е небесные сферы состоят из «жидкой» и прозрачной материи, типа эфира.