

# История и методология механики

Лекция № 6

Чиненова Вера Николаевна  
v.chinenova@yandex.ru

## План лекции

1. Небесная механика Тихо Браге
1. Жизнь и творчество И. Кеплера
3. Физические основы теории Кеплера. Понятие инерции
4. Законы И. Кеплера движения небесных тел
5. «Рудольфинские таблицы» И. Кеплера

## Требования к планетарной модели (Платон)

Платон формулирует принцип кругового, равномерного, постоянного и правильного движения небесных тел:

*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:

- 1) Траекториями движений являются окружности
- 2) Перемещения по этим окружностям осуществляются с постоянной скоростью.

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

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

# Небесная механика Тихо Браге

## Тихо Браге (1546-1601)



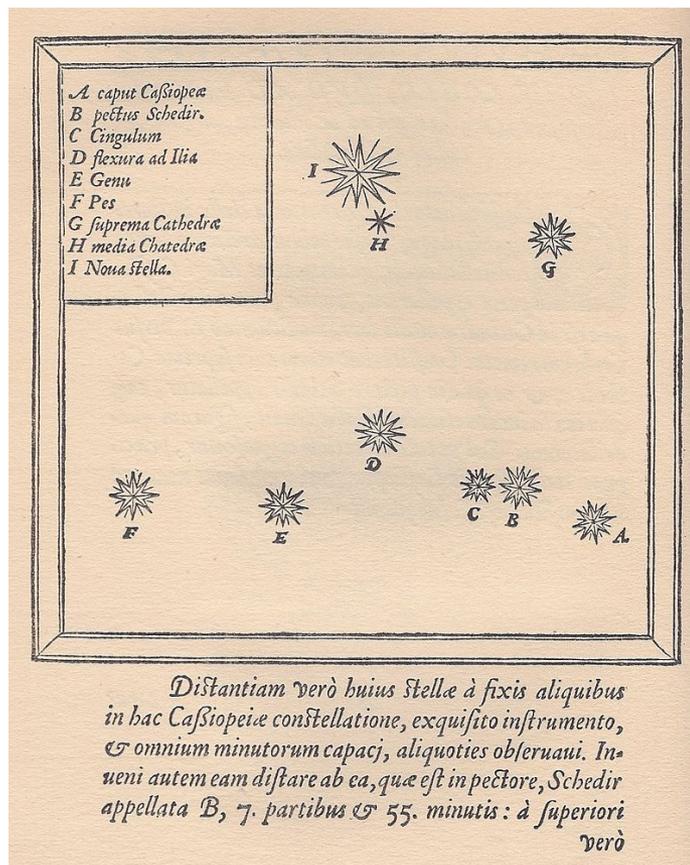
Тихо Браге, выдающийся датский астроном.

Вел астрономические наблюдения из обсерватории Ураниборг (Дания).

1599-1601 - придворный математик в Праге по приглашению императора Рудольфа II

## Сверхновая Тихо Браге 1572

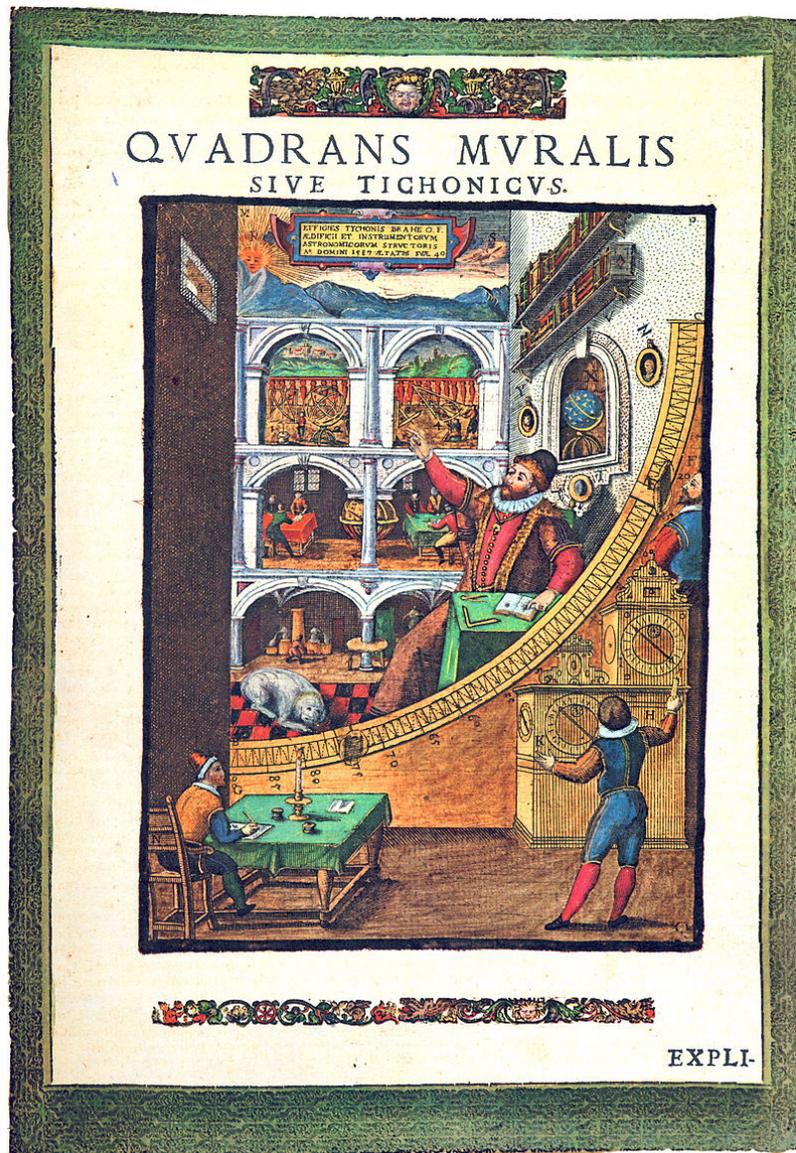
(рисунок из книги Тихо Браге). Буквой *I* обозначена сверхновая, звезды *F*, *E*, *D*, *B*, *G* составляют фигуру *W* Кассиопеи.



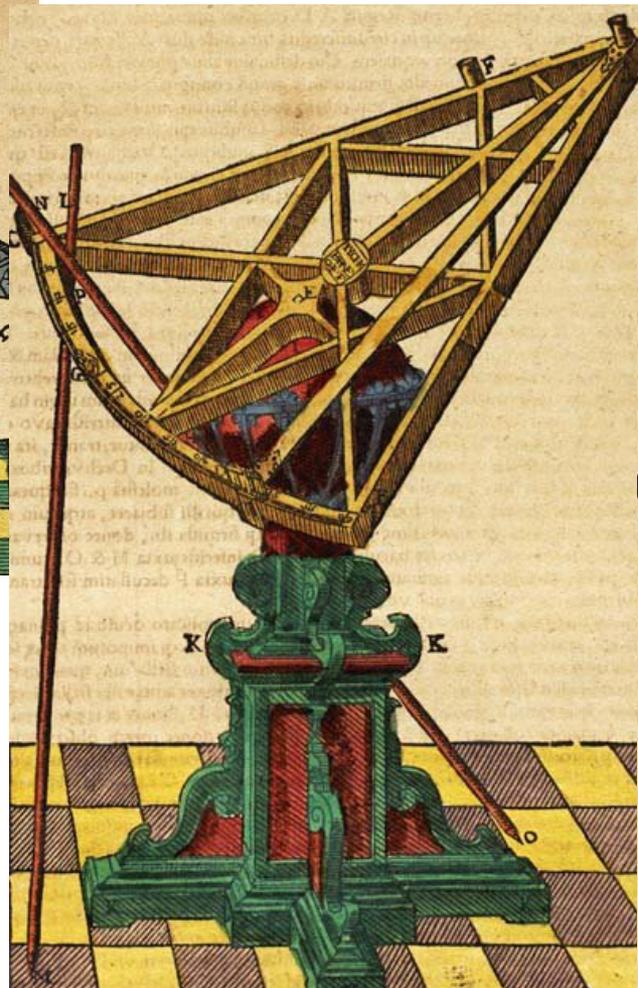
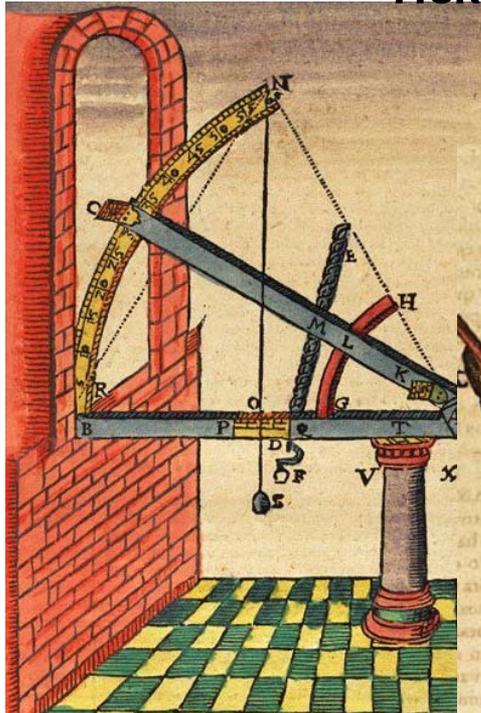
# Обсерватория Браге «Ураниборг — храм астрономии»



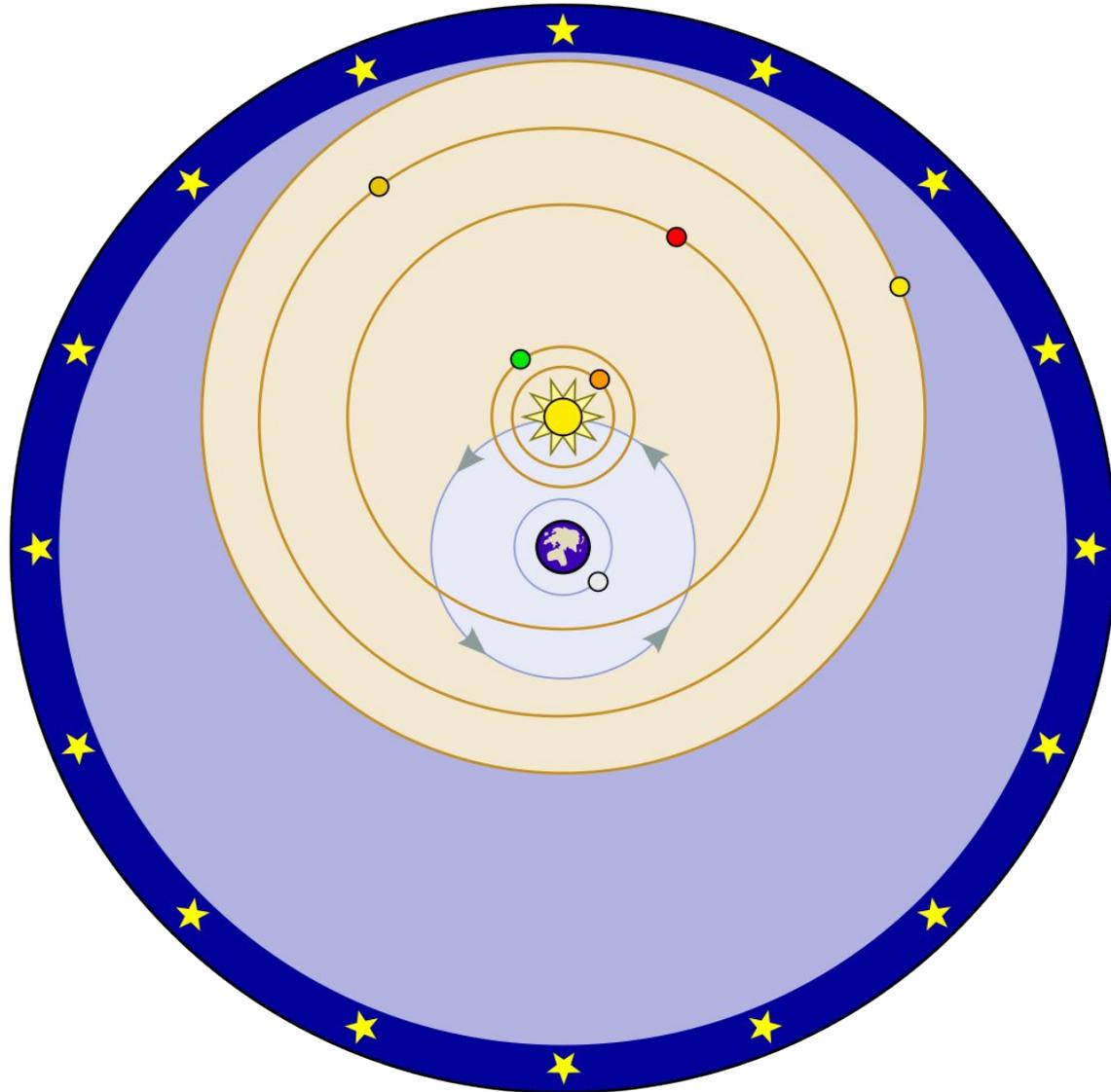
Квадрант Тихо Браге. В центре изображён сам Браге.



• Некоторые астрономические инструменты Тихо Браге:



# Система мира Тихо Браге



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

Первая компромиссная попытка согласовать физический подход с кинематическим

### «Приготовление к обновленной астрономии» (1582 г.)

Свою систему Браге противопоставляет 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 ...»

## 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.

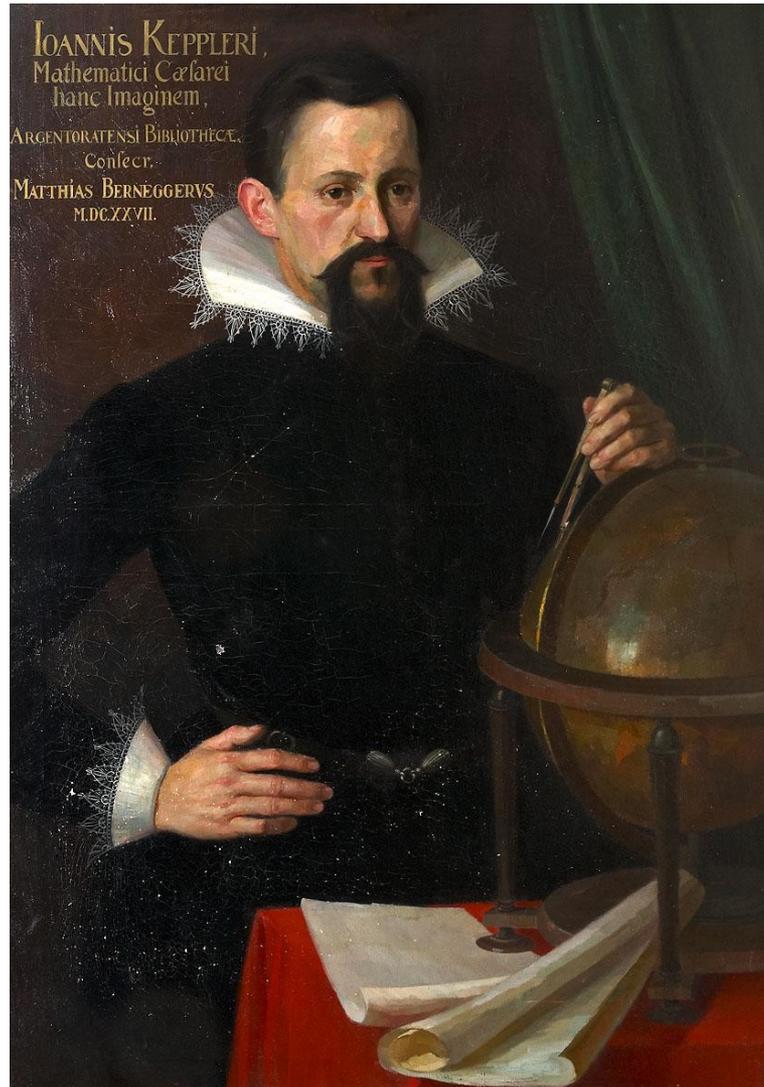
Тихо Браге отвергал систему Птолемея из-за ее сложности (чрезмерное умножение числа эпициклов).

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

# **Жизнь и творчество И. Кеплера**

Иога́нн Ке́плер (нем. *Johannes Kepler*;

27 декабря 1571 года, Вайль-дер-Штадт — 15 ноября 1630 года, Регенсбург)



## Иоганн Кеплер (1571 – 1630)

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

Он поступил в **университет г. Тюбинген** (сначала на факультет свободных искусств, к которым тогда причисляли и математику с астрономией).

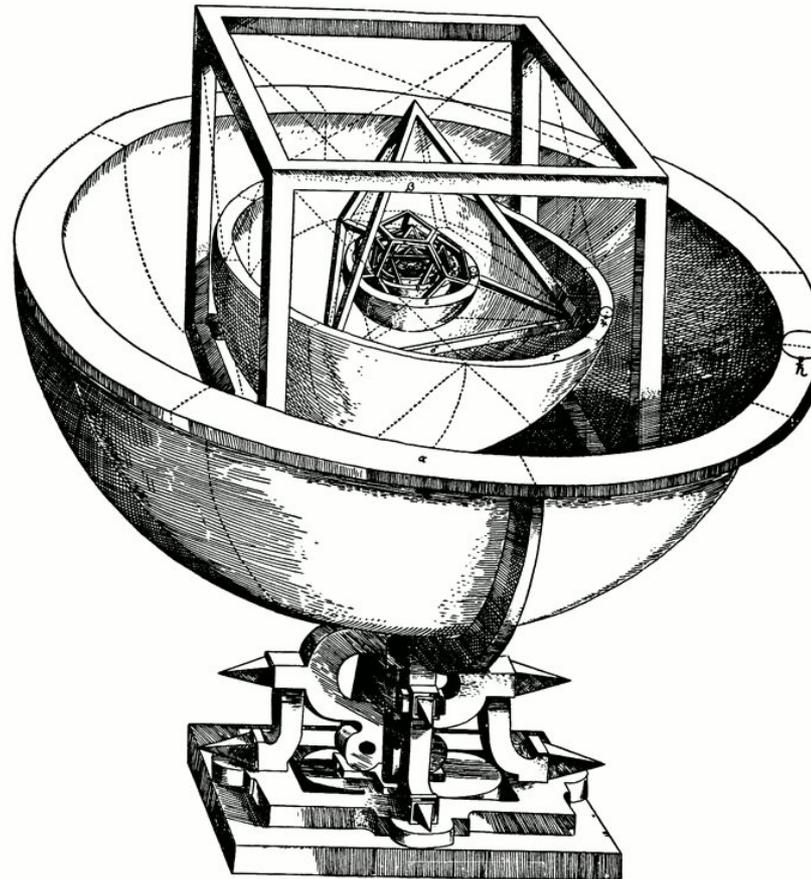
**1591**- сдал экзамен на **степень магистра**. Затем перешёл на теологический факультет. Первоначально Кеплер планировал стать священником. В Университете впервые услышал (от своего учителя М. Местлина) о теории Коперника и стал её убежденным сторонником.

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

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

**1600**- Кеплер покидает Грац в связи с преследованиями протестантов.

«Кубок Кеплера»: модель Солнечной системы из пяти платоновых тел.



## 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, жалование Кеплеру платили редко и скудно. Он вынужден был подрабатывать составлением гороскопов.

## Кеплер на пути к «Новой астрономии»

С огромным интересом и героическим трудолюбием Кеплер принялся за многолетние вычислительные работы по выяснению характера движения планет.

Труднее всего было объяснить движение **Марса**: его орбита наиболее заметно отличалась от окружности, она имеет заметный эксцентриситет, период обращения по сравнению с Юпитером и Сатурном не слишком велик, а условия наблюдения гораздо лучше, чем для Меркурия и Венеры.

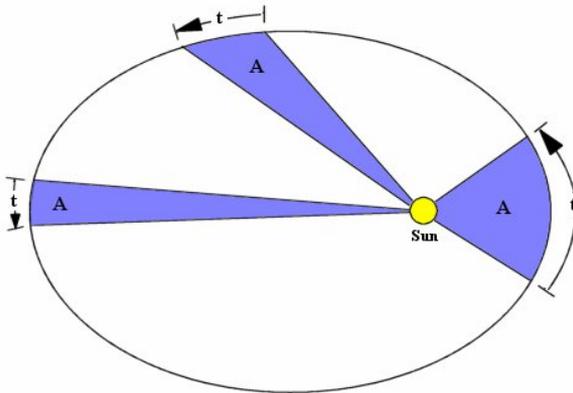
О Марсе наиболее достоверные наблюдения были собраны Тихо Браге, начавшего их обработку. Кеплер продолжил исследование Тихо Браге о движении Марса: нужно было выявить зависимость расстояния от Марса до Земли во времени, затем представить орбиту Марса около центра Солнца в гелиоцентрической системе. Вычисления привели Кеплера к выводу о том, что угол между плоскостями орбит Марса и Земли равен 1 градус 50'.

Далее, изменяя методы, предположения и подходы, пересчитывая в течение *пяти* лет до 70 раз все заново, Кеплер пришел к установлению **двух законов, носящих его имя.**

## На пути ко 2-му закону

Кеплер разбивает площадь орбиты Марса на множество треугольников, опирающихся на ее дуги, затем убеждается, что площади этих треугольников являются мерой времени их описания отрезком планета — Солнце. Используя закон площадей, выдвигая одну за другой гипотезы о форме орбиты, проводя утомительные вычисления, он, наконец, доказывает, что это **эллипс**, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Все эти результаты в основном были получены уже к 1605 г., но из-за различных трудностей, в особенности материальных, они были опубликованы только в **1609 г.** в трактате «**Новая астрономия**».



Второй закон Кеплера:  
закрашенные площади равны и проходятся за одинаковое время

Именно Кеплер ввёл в физику термин инерция как прирождённое свойство тел сопротивляться приложенной внешней силе.

Заодно он, как и Галилей, формулирует в ясном виде первый закон механики: ***всякое тело, на которое не действуют иные тела, находится в покое или совершает равномерное прямолинейное движение***

Кеплер вплотную подошёл к открытию закона тяготения, хотя и не пытался выразить его математически.

Он писал в книге **«Новая астрономия»**, что в природе существует «взаимное телесное стремление сходных (родственных) тел к единству или соединению». Источником этой силы, по его мнению,

является магнетизм в сочетании с вращением Солнца и планет вокруг своей оси.

В другой книге Кеплер уточнил:

*Гравитацию я определяю как силу, подобную магнетизму — взаимному притяжению. Сила притяжения тем больше, чем оба тела ближе одно к другому.*

## Переписка с Галилеем

В 1610 г. вышло небольшое, но сенсационное произведение Галилея — «**Звездный вестник**», которое Галилей послал Кеплеру. С помощью изобретенного им телескопа Галилей увидел и описал в «Звездном вестнике» **четыре спутника Юпитера, фазы Венеры**, которые Галилей объяснил так же, как и серп Луны. Суть объяснения сводилась к тому, что Луна, Венера (и другие планеты) — той же природы, что и Земля: они не светят, а отражают лучи Солнца. Обладая феноменальным зрением, Тихо Браге выдвигал возражения против гелиоцентрической системы, суть которых заключалась в том, что он не видит серпа Венеры, который доказывал бы вращение Венеры около Солнца. Таким образом, Галилей снял эти возражения Тихо Браге.

Галилей измерил период собственного вращения Солнца (наблюдая пятна)—27 дней.

19 апреля 1610 г. Кеплер поспешил отправить ответ на послание Галилею. Это письмо-отзыв о «Звездном вестнике» написано Кеплером в взволнованном тоне: удивление, преклонение перед авторитетом Галилея, размышление о победоносном развитии идей Коперника. Письмо было опубликовано и неоднократно переиздавалось под названием «**Разговор с звездным вестником**».

Кеплер пишет Галилею, что наличие четырех Лун около Юпитера означает, что такие же могут быть и у других планет. Он предполагает, что у Марса должно быть два спутника, шесть или восемь у Сатурна и по одному или двум у Венеры и Меркурия.

В XIX в. были открыты два спутника Марса, к тому же времени — девять спутников Сатурна.

Дружеская переписка двух великих современников, борцов за коперниканство — Галилея и Кеплера — продолжалась, к сожалению, недолго. Если Кеплер безоговорочно верил Галилею, то Галилей не принял законов Кеплера, оставшись верным идее круговой инерции, т. е. тезису о круговом, равномерном движении планет.

В 1611 г. кончился сравнительно благополучный период жизни Кеплера; престол занял брат императора Рудольфа, Матвей, который утвердил почетную, т. е. без жалованья, должность придворного математика за Кеплером. С большим трудом Кеплеру удалось получить место профессора математики в Линце с 1612 г.

Семейные бедствия преследовали ученого: тяжело заболела жена, умирали дети.

Вскоре мать ученого обвинили в колдовстве и начали против нее процесс, длившийся шесть лет.

## 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.

**1618-1621** – публикация второй важной работы **«Очерки коперниканской астрономии»** (в трёх томах). В этом сочинении Кеплер распространил свою теорию на известные к тому времени планеты, он нашел эксцентриситеты их орбит и изложил астрономию по-новому.

**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».*

Сочинение Кеплера «**Гармония мира**», явившееся продолжением «Космографической тайны», появилось в свет только через 23 года, в **1619** г. Кеплером открыт и опубликован **третий закон** движения планет: «Если хочешь знать точное время открытия этого соотношения, то скажу, что 8 марта 1618 года оно было задумано, но дурно, к несчастью, вычисленное, отброшено как ложное; 15 мая вернулось с новой силой и рассеяло мрак моего ума. Оно в такой точности согласовалось с наблюдениями Тихо, что я думал, что брежу... Но дело оказалось вполне верно и в высшей степени точно: времена обращений планет относятся между собой как полуторные степени их средних расстояний».

Открытые Кеплером три закона движения планет полностью и с превосходной точностью объяснили видимую неравномерность этих движений.

Вместо многочисленных надуманных эпициклов модель Кеплера включает только одну кривую — эллипс.

Второй закон установил, как меняется скорость планеты при удалении или приближении к Солнцу, а третий позволяет рассчитать эту скорость и период обращения вокруг Солнца.

Три закона Кеплера 1-ый закон:

Планеты движется по эллипсам, в

одном из фокусов которых находится Солнце.

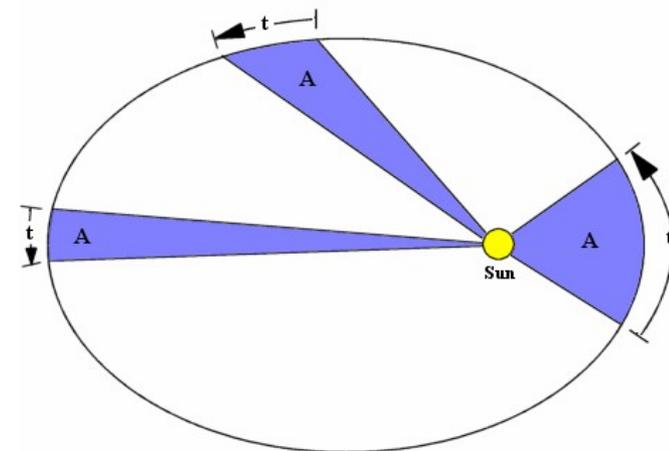
*(Фактически этот закон справедлив только для системы из двух тел, например, для двойной звезды или Земли вокруг Солнца - для простоты предполагая, что другие планеты отсутствуют) .*

2-ой закон: Линия, соединяющая Солнце и Планету, за равные интервалы времени, заметает 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

Хотя исторически кеплеровская система мира основана на модели Коперника, фактически у них очень мало общего (только суточное вращение Земли). Исчезли круговые движения сфер, несущих на себе планеты, появилось понятие планетной орбиты.

В системе Коперника Земля всё ещё занимала несколько особое положение, поскольку центром мира Коперник объявил центр земной орбиты.

У Кеплера Земля — рядовая планета, движение которой подчинено общим трём законам. Все орбиты небесных тел — эллипсы (*движение по гиперболической траектории открыл позднее Ньютон*), общим фокусом орбит является Солнце.

Летом 1627 года Кеплер после 22 лет трудов опубликовал (за свой счёт) астрономические таблицы, которые в честь императора назвал «Рудольфовыми». Спрос на них был огромен, так как все прежние таблицы давно разошлись с наблюдениями. Немаловажно, что труд впервые включал удобные для расчётов таблицы логарифмов. Кеплеровы таблицы служили астрономам и морякам вплоть до начала XIX века.

Через год после смерти Кеплера Гассенди наблюдал предсказанное им прохождение Меркурия по диску Солнца. В 1665 году итальянский физик и астроном Джованни Альфонсо Борелли опубликовал книгу, где законы Кеплера подтверждаются для открытых Галилеем спутников Юпитера.

## И.Кеплер «Рудольфинские таблицы»

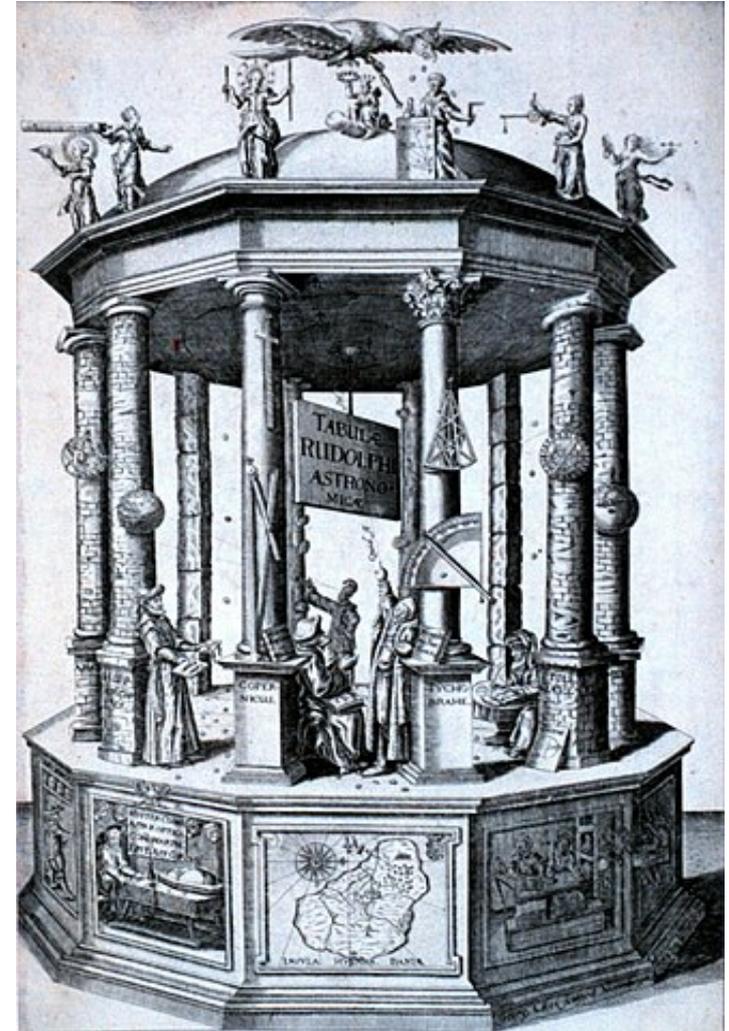
Tabulae Rudolphinae

Обложка *Рудольфинских таблиц*, на которой изображены Гиппарх, Птолемей, Коперник и Тихо Браге.

*Рудольфинские таблицы* были названы по имени императора Священной римской империи Рудольфа II.

Это были первые таблицы движения планет, составленные с помощью логарифмических вычислений и на основе законов движения планет.

Кеплер был первым, кто применил логарифмические вычисления в астрономии, и *Рудольфинские таблицы* он смог завершить только благодаря новому средству.



Отношение Кеплера к астрологии было двойственным. С одной стороны, он допускал, что земное и небесное находятся в некоем гармоничном единстве и взаимосвязи. С другой — скептически оценивал возможность использовать эту гармонию для предсказания конкретных событий.

Кеплер говорил: *«Люди ошибаются, думая, что от небесных светил зависят земные дела»*

Широко известно также другое его откровенное высказывание:

*«Конечно, эта астрология глупая дочка; но, Боже мой, куда бы делась её мать, высокомудрая астрономия, если бы у неё не было глупенькой дочки!»*

*Лучше издавать альманахи с предсказаниями, чем просить милостыню.*

*Астрология – дочь астрономии, хоть и незаконная, и разве не естественно, чтобы дочь кормила свою мать, которая иначе могла бы умереть с голоду».*

Обстоятельства жизни Кеплера оставались тяжелыми: его семья всегда нуждалась, ни император, ни полководец Валленштейн, которому Кеплер составлял гороскопы, жалованья ему не выплачивали.

Эти обстоятельства привели Кеплера к безвременной смерти 15 ноября 1630 г.

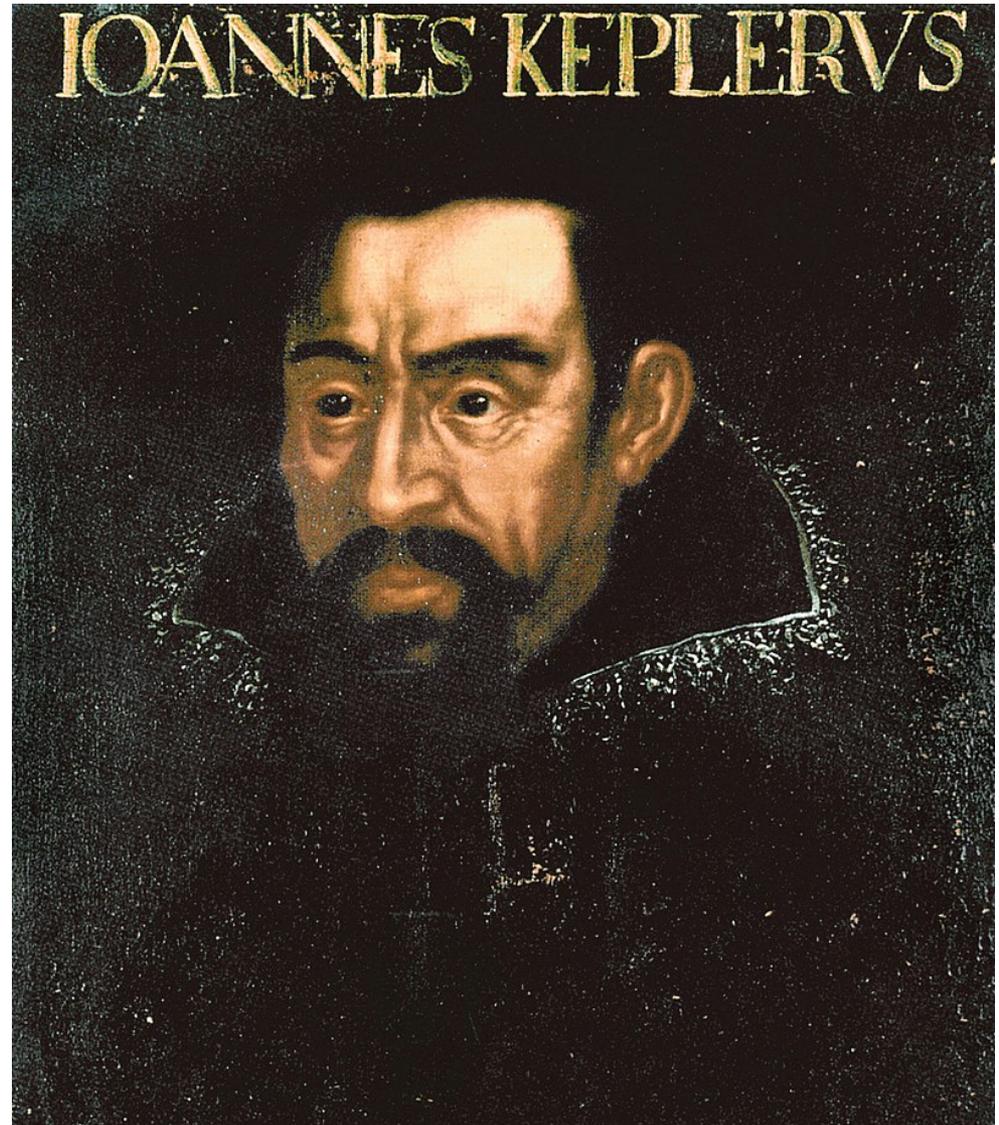
Ценнейшие рукописи научных трудов Кеплера переходили из рук в руки, блуждая по странам Европы. В XVIII в. по инициативе Эйлера Петербургская академия наук приобрела 18 томов рукописей Кеплера (четыре тома попало до этого в Вену).

Научный вклад Кеплера в развитие математики, оптики, механики и астрономии не утратил ценности и в наше время.

В связи с развитием космонавтики усилился интерес к небесной механике и к теории кеплеровых движений, как часто называют теорию движения точки под действием центральной силы.

Система мира Ньютона основана на трех законах Кеплера.

*«Я измерил небеса,  
Землю теперь измеряю.  
Дух воспарил в небеса.  
Тело распалось прахом»*



## 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».

# Памятник Кеплеру и Тихо Браге, Прага

