

# **История и методология механики**

Евгений Алексеевич Зайцев  
e\_zaitsev@mail.ru

Лекция № 15

## План лекции

### Тема. 1

Завершение научной революции XVII в. Построение механической картины мира.  
Проблема тяготения.

### Тема. 2

Гипотеза обратных квадратов Р. Гука и теория тяготения И. Ньютона

### Тема 3.

Трактат И. Ньютона «Математические начала натуральной философии».  
Полемика картезианцев и ньютонианцев

Тема. 1  
Проблема тяготения.

## Понятие «сила тяжести»

В механике Нового времени сила тяжести ничем не отличается от прочих сил. Словосочетание «сила тяжести» представляется, поэтому, совершенно естественным. Это связано с тем, что все взаимодействия в современной науке являются «насильственными». Кроме того, именно сила тяжести, действие которой было изучено раньше действия прочих сил, стала в последствии «образцом» для них.

Пример: электростатическая сила.

В доклассической физике словосочетание «сила тяжести» было невозможным. Ибо оно является незаконным соединением двух разнородных понятий или противоречием в понятиях (оксюморон).

Первое из понятий, «сила» указывает на внешнее насильственное действие, приводящее к неестественному, насильственному перемещению. Второе, «тяжесть», напротив, обозначает внутреннюю, естественную (природную) причину движения.

Вопрос о тяжести,

как причине движения с ускорением при свободном падении. Два мнения

Мнение 1. Для построения динамики вопрос о причинах ускорения свободного падения не существен

Сальвиати ( alter ego Галилея):

«Мне думается, что сейчас неподходящее время для занятий вопросом о причинах ускорения естественного движения тел, по поводу которого различными философами было высказано столько различных мнений. Будет достаточно, если мы рассмотрим, как он [Галилей] исследует и излагает свойства ускоренного движения (безотносительно к причинам последнего)».

Галилей, «Беседы и математические доказательства» (1638, с.301-302)

Мнение 2. Вопрос о природе тяжести причинах ускорения свободного падения имеет первостепенное значение

Декарт :

«Невозможно сказать что-либо хорошее и прочное касательно скорости, не разъяснив на деле, что такое *тяжесть* и вместе с тем вся система мира».

Письмо Мерсенну (12 сентября  
1638 г.)

Сочинения, т. II, с. 335

# Ж.П. РОБЕРВАЛЬ (1602-1675) О ПРИРОДЕ ТЯЖЕСТИ

Согласно Робервалю,

возможны три различные точки зрения на природу тяжести:

- тяжесть заключена в самом тяжелом теле (Аристотель);
- тяжесть — результат взаимодействия между двумя телами по принципу «подобное стремится к подобному» (Н. Коперник, И. Кеплер);
- тяжесть производится третьим телом, толкающим одно к другому (Декарт).

Замечание Представление о дальнодействии (в духе И.Ньютона) в этом списке отсутствует.

## Ж.П. РОБЕРВАЛЬ (1602-1675) О ПРИРОДЕ ТЯЖЕСТИ

Роберваль отказывается принять какую-либо из вышеизложенных точек зрения:

«Я всегда по возможности буду стараться подражать Архимеду, который именно в связи с тяжестью выдвигает в качестве принципа или постулата постоянный и во все минувшие до сей поры столетия засвидетельствованный факт: существуют тяжелые тела, отвечающие условиям, о которых он говорит в начале своего трактата на эту тему.

На этом основании я, как и он, построю свои рассуждения о механике, не затрудняя себя вопросом, что же такое в конце концов начала и причины тяжести, и довольствуясь тем, что буду следовать истине, если она пожелает когда-либо предстать ясно и отчетливо передо мною.

Вот правило, которого я всегда хочу держаться в сомнительных рассуждениях...»

(1669)

## И. НЬЮТОН О ВСЕМИРНОМ ТЯГОТЕНИИ

Кредо ньютоновской механики – отказ от ответа на вопрос о природе тяготения (тяжести):

### Фрагмент 1

«Под словом притяжение я разумею здесь вообще какое бы то ни было стремление тел к взаимному сближению – безразлично, происходит ли это стремление от действия самих тел, которые стараются сблизиться или приводят друг друга в движение посредством испускаемого ими эфира, либо, наконец, оно вызывается материальной или нематериальной средой – эфиром, воздухом ...».

«Математические начала натуральной философии»

(1687, кн. I, с. 244 )



## И. НЬЮТОН О ВСЕМИРНОМ ТЯГОТЕНИИ

### Фрагмент 2

«То, что я называю притяжением, может происходить посредством импульса или какими-нибудь другими способами, мне неизвестными.

Я применяю здесь это слово для того, чтобы только вообще обозначить некоторую силу, благодаря которой тела стремятся друг к другу, какова бы ни была причина.

Ибо мы должны изучить по явлениям природы, какие тела притягиваются и каковы законы и свойства притяжения, прежде чем исследовать причину, благодаря которой притяжение происходит».

«Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света» (1704, с. 292 )

## И. НЬЮТОН О ВСЕМИРНОМ ТЯГОТЕНИИ

### Фрагмент 3

«Причину... этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю.. . (hypotheses non fingo)

Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря».

«Математические начала натуральной философии»  
(1687, кн. III, с. 662)

Декарт. Излагает мнение о том, что вес тела уменьшается с увеличением расстояния от центра Земли

«Есть и третье мнение – тех, кто считает, что тяжесть всегда относительна и что сила, которая заставляет падать тяжелые тела, находится не в них, а в центре Земли, или же во всей ее массе, которая притягивает тела к себе, как магнит притягивает железо, или каким-либо другим подобным образом.

Они считают, что, поскольку магниты и другие природные силы (*agens naturels*) ... действуют вблизи сильнее, чем вдали, то ... одно и то же тело имеет тем больший вес, чем ближе оно находится к центру Земли».

Декарт, Письмо Мерсенну от 13.06.1638  
(*Oeuvres*, Adam-Tannery, t. 2 , p. 224)

Декарт. Скептическое отношение к возможности  
опытного определения зависимости между величиной силы тяжести и  
расстоянием от центра Земли

Далее Декарт пишет о том, что он не может присоединиться ни к одному из изложенных мнений.

И вот почему:

«Единственно, что можно сказать, что *природа тяжести* есть вопрос факта, то есть, люди не могут определить ее иначе, как производя опыты, а из опытов, производимых здесь, в нашем воздухе, нельзя судить о том, что происходит гораздо ниже, около центра Земли, или гораздо выше, за облаками, ибо если убывание или возрастание тяжести происходит, то маловероятно, чтобы оно происходило везде в одинаковой пропорции».

Декарт, Письмо Мерсенну от 13.06.1638  
(Oeuvres, Adam-Tannery, t. 2 , pp. 224-5)

## Декарт. Опыт по определению убывания и возрастания силы тяжести в зависимости от расстояния от центра Земли

Описание возможного опыта:

Свинцовый груз (вместе с веревкой) взвешивается на вершине башни. Затем веревка прикрепляется одним концом к чашке весов, а другой ее конец, нагруженный свинцом, опускается в колодец.

Разность в весе (если ее удастся установить) будет свидетельствовать об изменении силы тяжести в зависимости от расстояния тела от центра Земли.

Проблематичность опыта. Декарт понимал, что опыт мог дать результаты лишь в том случае, если разница в весе оказывалась весьма значительной. Между тем глубина колодца и высота башни малы по сравнению с радиусом Земли.

Декарт, Письмо Мерсенну от 13.06.1638  
(Oeuvres, Adam-Tannery, t. 2 , p. 225)

Декарт. Два аргумента (опытных факта) в поддержку тезиса об убывании тяжести с увеличением расстояния от Земли.

Первый аргумент:

«Другой опыт, ... убедительно свидетельствует о том, что тела, находящиеся далеко от центра Земли, ощущают ее действие не так сильно, как те, которые находятся близко к ней. Планеты ..., такие как Луна, Венера, Меркурий и т. д., состоящие, вероятно, из той же материи, что и Земля, ... испытав мощное действие Земли, упали бы на нее, если бы не большое расстояния, совершенно лишившие их склонности [падению]».

Второй аргумент

«Крупным птицам, например журавлям и аистам, гораздо легче летать на высоте в воздухе, чем внизу, и это нельзя целиком отнести на счет силы воздуха, ибо то же самое бывает и в тихую погоду, а это дает основание думать, что их удаленность от Земли делает их более легкими.

Подтверждают нам это и бумажные змеи, запускаемые детьми, а также снег, находящийся в облаках»

Декарт, Письмо Мерсенну от 13.06.1638  
(Oeuvres, Adam-Tannery, t. 2 , p. 225)

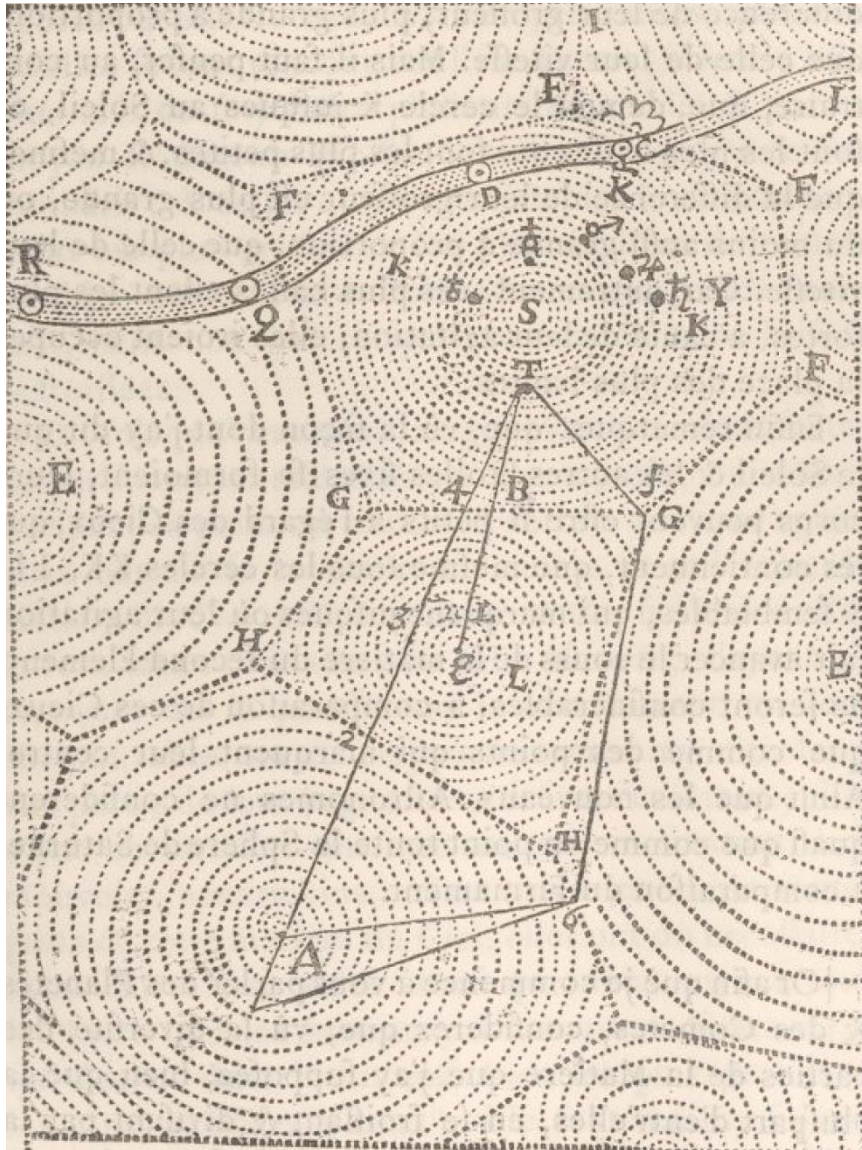
## Декарт о вихревой природе тяготения. Теория вихревого движения небесных тел. «Мир или трактат о свете» (1630-34)

Причиной тяжести является вихревое движение тонкой материи, окружающей тела (водовороты).

□ Небесные тела увлекаются водоворотами жидкой, тонкой материи по направлению к Солнцу. Большая скорость вращения небесных тел вызывает действие центробежной силы, которая уравнивает центростремительное действие водоворотов. Поэтому планеты не падают на Солнце. Поведение планет напоминает поведение тел, переносимых течением воды.

□ Земные тела увлекаются водоворотами воздуха по направлению к Земле. По этой причине тела обладают тяжестью, тяготеют к Земле и предоставленные самим себе падают на ее поверхность.

# Декарт. Теория вихревого движения небесных тел «Мир или трактат о свете» (1630-34)



Вселенная – совокупность смежных вихрей.

Вихрь с центром в  $S$  — Солнечная система. В точке  $S$  — Солнце, состоящее из первого элемента (огня).

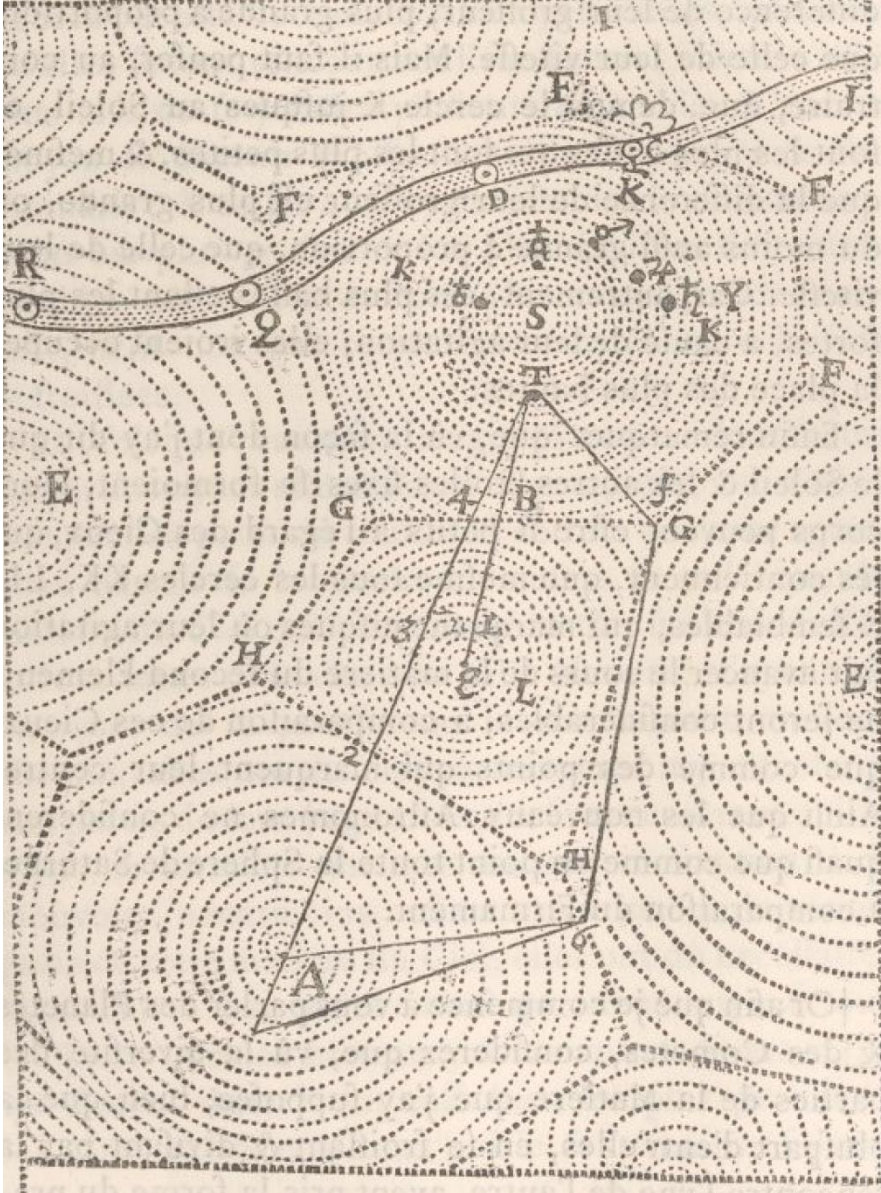
Вихрь, вращающийся вокруг Солнца, состоит из частиц второго элемента (воздуха), которые различаются по размеру: самые маленькие и самые быстрые занимают нижнюю область (около  $S$ ), самые большие и самые медленные – верхнюю область.

Частицы вихря упорядочены в соответствии с размерами: более крупные реализуют свое стремление следовать прямолинейному пути полнее, чем маленькие. Это верно также и для планет, которые состоят из частиц третьего элемента (земли).

CDQR – путь кометы



## Планетарная теория Декарта – аналогия с движением судов по воде



«Отсюда вы видите, почему различные планеты могут висеть на различных расстояниях от Солнца внутри круга *K*, почему также наиболее отдаленными из планет будут не просто те, которые внешне кажутся самыми большими, но те, которые по своему внутреннему строению наиболее плотны и массивны».

### Аналогия

«Мы знаем из опыта, что суда, плывущие по реке, никогда не движутся так быстро, как несущая их вода, и самые большие из них не плывут так быстро, как самые малые. Точно так же, хотя планеты и следуют, не сопротивляясь течению материи неба, по одному руслу с нею, это не значит еще, что они всегда движутся столь же быстро, как эта материя».

Почему планеты остаются внутри вихря,  
а кометы переходят из одного вихря в другой?

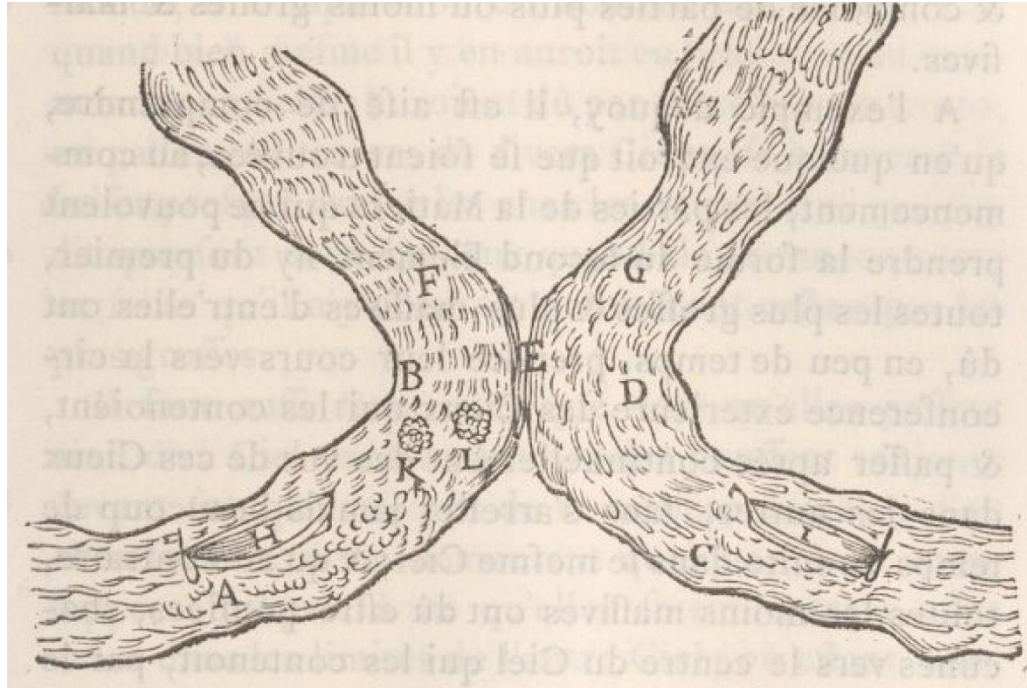
«...Из всех плавущих по воде тел наиболее тяжелые и массивные (какими обыкновенно бывают самые большие и очень нагруженные суда) всегда обладают значительно большей по сравнению с водой способностью продолжать свое движение, хотя бы оно и было получено только от одной воды.

Напротив, очень легкие тела, например белая пена, скопившаяся и плавающая на поверхности рек во время бури, обладают такой способностью в значительно меньшей степени».

Почему планеты остаются внутри вихря, а кометы переходят из одного вихря в другой? Ответ: кометы массивные, планеты - легкие

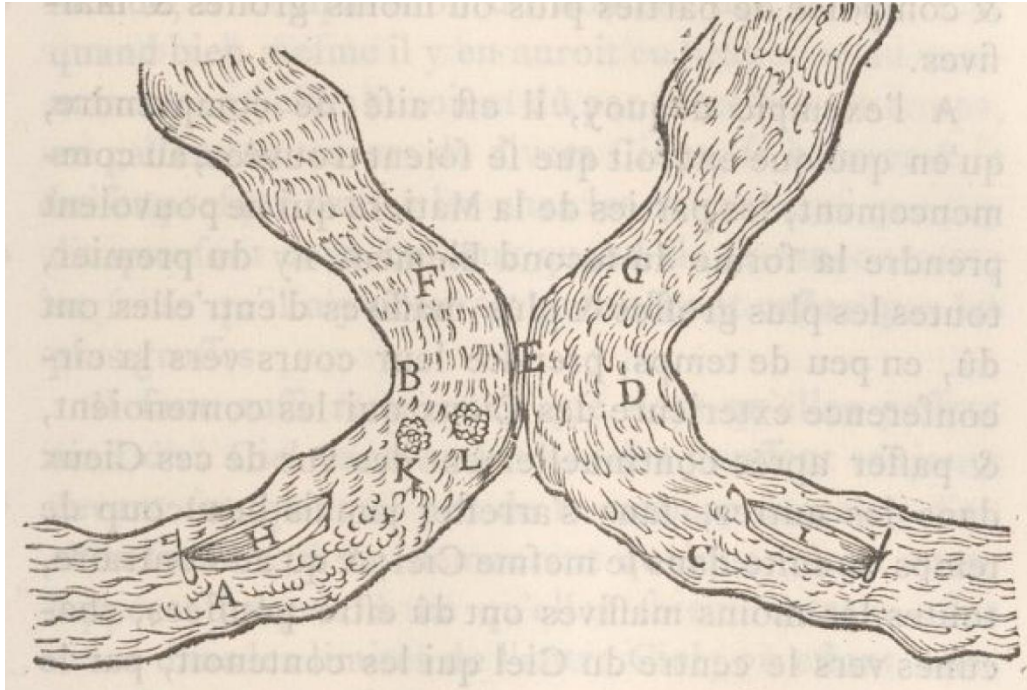
«Представьте себе две реки, соединенные в каком-либо месте и снова разделяющиеся немного дальше, прежде чем успеют смешаться их воды ...

В этом случае суда и другие массивные и тяжелые тела, уносимые течением одной реки, могут легко перейти из этой реки в другую, в то время как самые легкие, наоборот, будут от нее удаляться и отбрасываться силой течения этой воды к тем местам, где оно не столь быстрое».



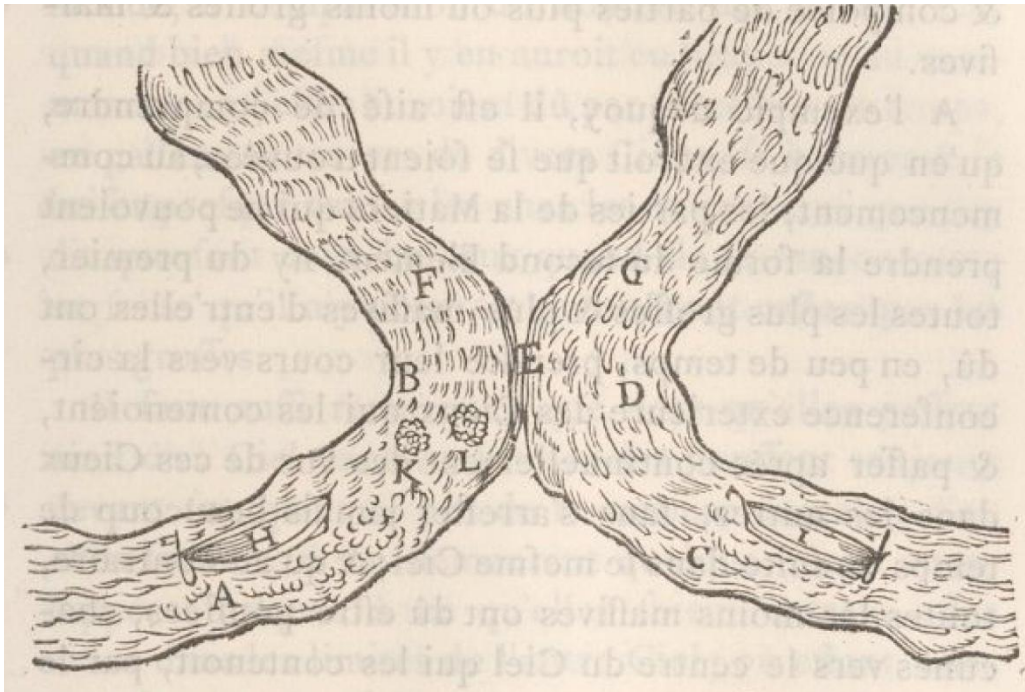


Почему планеты остаются внутри вихря, а кометы переходят из одного вихря в другой? Ответ: кометы массивные, планеты - легкие



«Пользуясь этим примером, легко понять, что самые большие и самые массивные частицы материи, которые не могли принять ни формы второго, ни формы первого элемента, ... должны были через некоторое время направиться к внешней поверхности вмещающего их неба, а затем постоянно переходить из одного неба в другое ...

Почему планеты остаются внутри вихря, а кометы переходят из одного вихря в другой? Ответ: кометы массивные, планеты - легкие

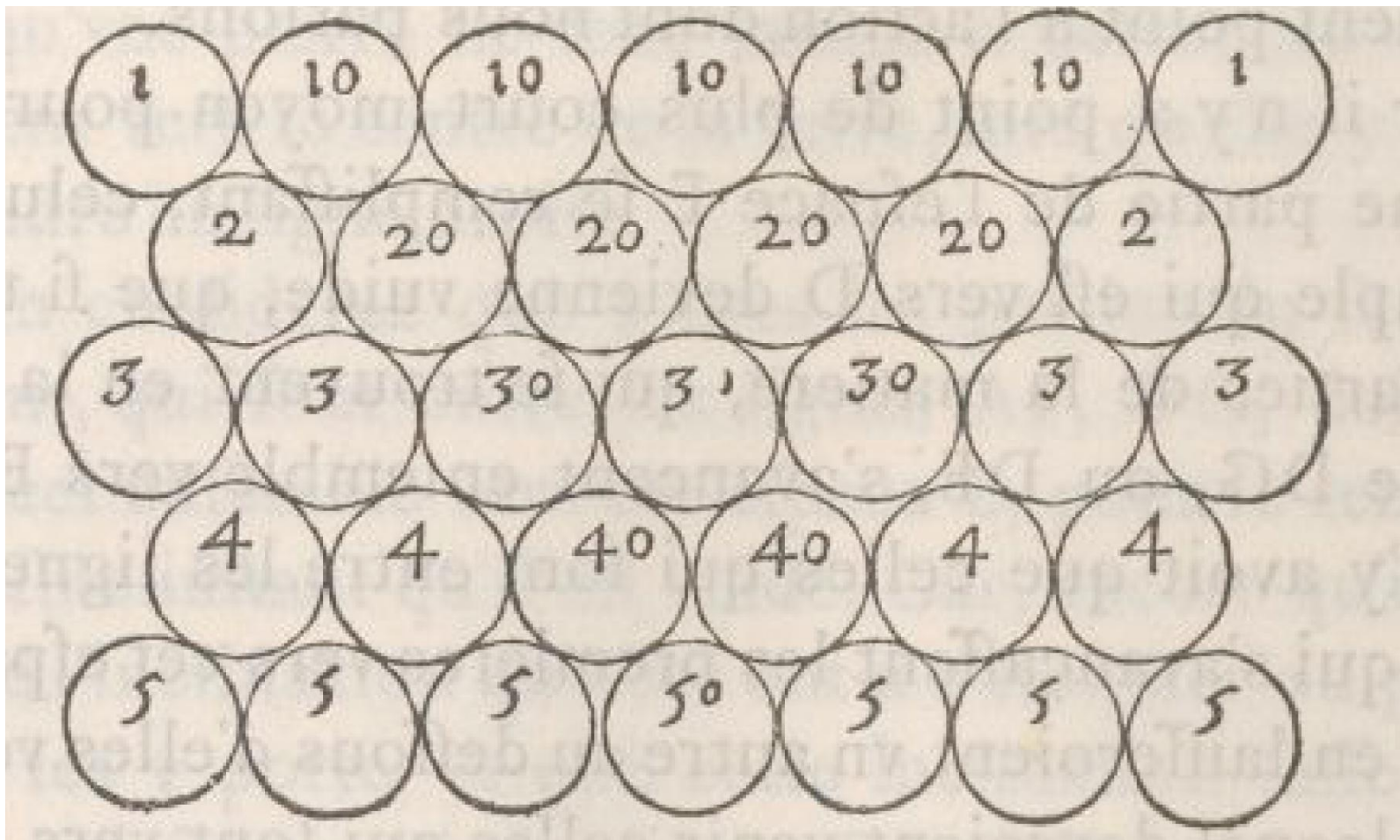


«Наоборот, все менее массивные из этих частиц должны быть отнесены движением материи неба к центру этого неба. ...

Таким образом, одни частицы материи должны направиться к внешней поверхности неба, а другие — к его центру.

Те частицы материи, которые расположены около центра какого-нибудь неба, мы должны здесь принять за планеты, а те, которые проходят через различные небеса, мы должны считать кометами».

Фрагмент мирового эфира (по Декарту). Передача воздействия от одной части среды (эфира) к другой посредством толчка. Отсутствие пустот.





## Теория зрения Декарта («Диоптрика», 1642)

«Ощупывание» предметов глазом посредством среды (эфира). Подобно тому, как слепец ощупывает свой путь при помощи палки, глаз «ощупывает» вещи посредством эфирного столба, находящегося между ним и этими вещами.



## Джованни Альфонсо Борелли (1608-1679)

«Теория медийских планет, выведенная из физических причин» (1666)

Три главные фигуры в астрономии (до Ньютона) – Коперник, Кеплер, Борелли

### Основные тезисы Борелли:

1. Планеты стремятся к Солнцу по той же причине, по которой тяжелые тела стремятся к Земле.

2. Движение планет вокруг Солнца подобно движению камня в праще: «инстинкт», заставляющий планету стремиться к Солнцу, уравновешивается ее стремлением удаляться от центра (то есть, центробежной силой).

3. Каждая планета движется под действием трех сил:

- сила «естественного» стремления планеты к Солнцу (направлена к Солнцу),
- сила солнечного света, заставляющая планету вращаться вокруг Солнца (ср. Кеплер!)
- сила отталкивания планеты от Солнца, которая является следствием ее вращения вокруг Солнца



## Понятие тяжести и центробежной силы Х. Гюйгенса

### «О центробежной силе» (1703)

И. Ньютон о значении результатов Гюйгенса для небесной механики:

«... если тело обращается около Земли по кругу под действием силы тяжести, то эта сила и есть центростремительная. Такого рода предложениями Гюйгенс в превосходном своем сочинении «Маятниковые часы» и сопоставил силу тяжести с центробежными силами обращающихся тел» (И.Ньютон).

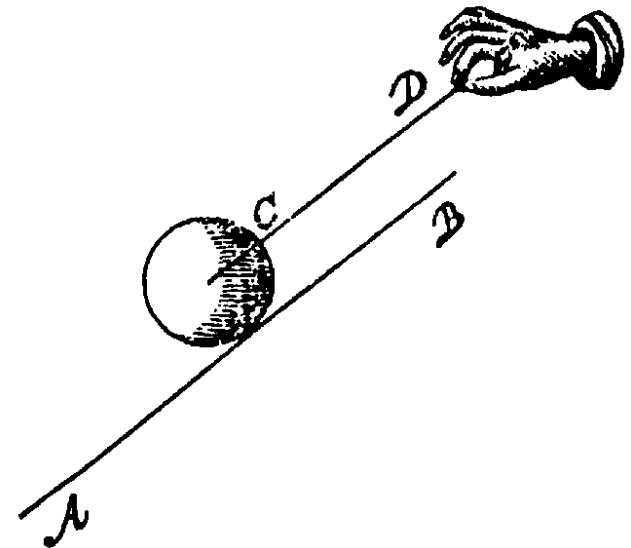
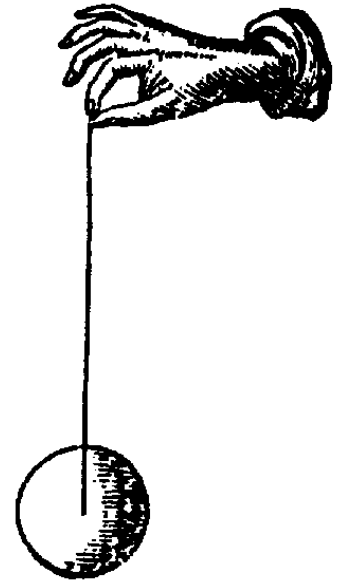
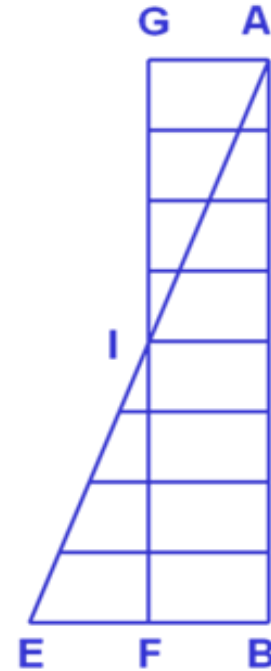
### Гюйгенс – картезианец

Отправной точкой теории центробежной силы, развитой Гюйгенсом, была попытка дать механическое объяснение тяжести в русле идеи Декарта, что тяжесть (земное притяжение тела) – это результат центростремительного действия на тело вращающегося космического вихря.

На этом пути Гюйгенс приходит к выводу о том, что количественной характеристикой силы должно служить изменение скорости за (бесконечно) малый промежуток времени, т.е. ускорение.

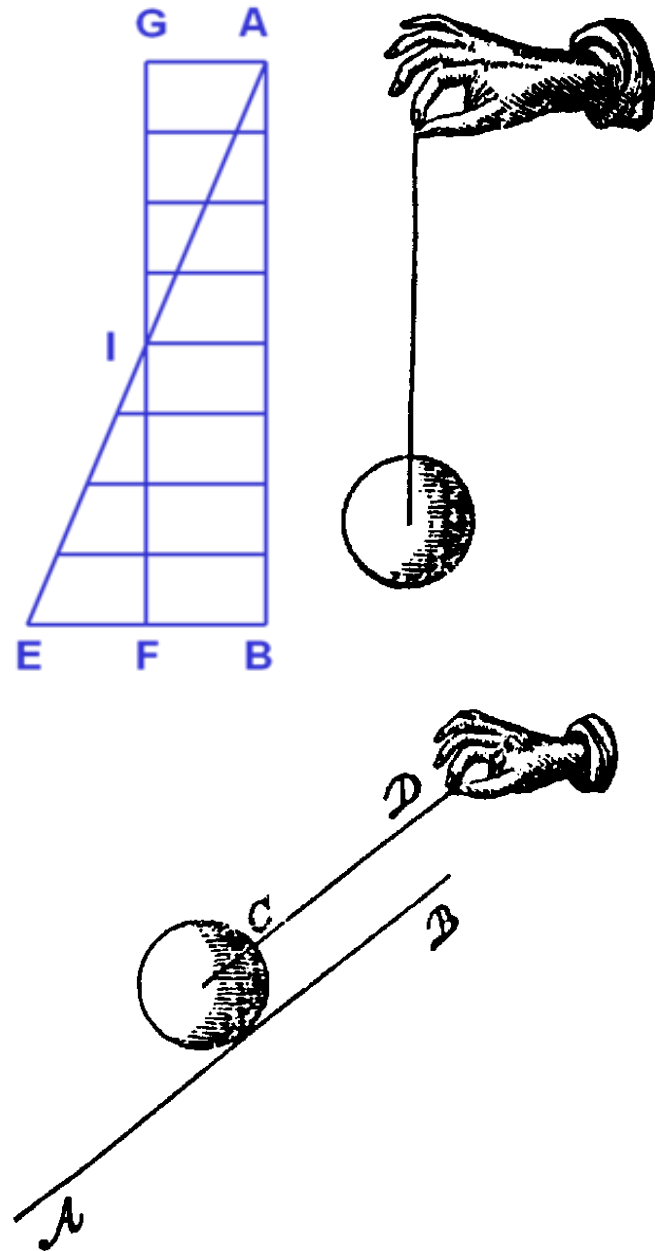
## Х. Гюйгенс. «О центробежной силе» (1703)

- Гюйгенс начинает с изложения теории Галилея о свободном падении и падении (спуске) по наклонной плоскости.
- Основной характеристикой этих движений является постоянство ускорения.
- Далее он вводит понятие «стремление (груза) к движению» (лат. *conatus*).
- Стремление груза к движению можно измерить движением, которое будет произведено грузом в случае его отрыва от нити.



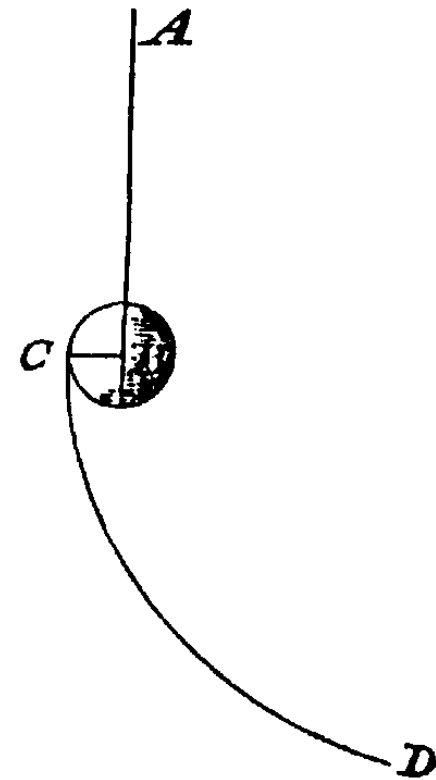
## Х. Гюйгенс. «О центробежной силе» (1703)

- Рассматривается два случая:  
стремление к движению шара, подвешенного вертикально, и  
стремление к движению шара, удерживаемого нитью на наклонной плоскости.
- В обоих случаях отделившийся от нити шар будет спускаться вниз по *правилу нечетных чисел*:  
в последовательные единицы времени он будет проходить расстояния, находящиеся в соотношении:  
 $1, 3, 5, 7, \dots$ ;  
при этом общее пройденное им расстояние будет увеличиваться согласно правилу квадратов (пропорционально квадрату времени):  
 $1, 4, 9, 16, \dots$



## Рождение современного понятия силы (Х. Гюйгенс. «О центробежной силе»)

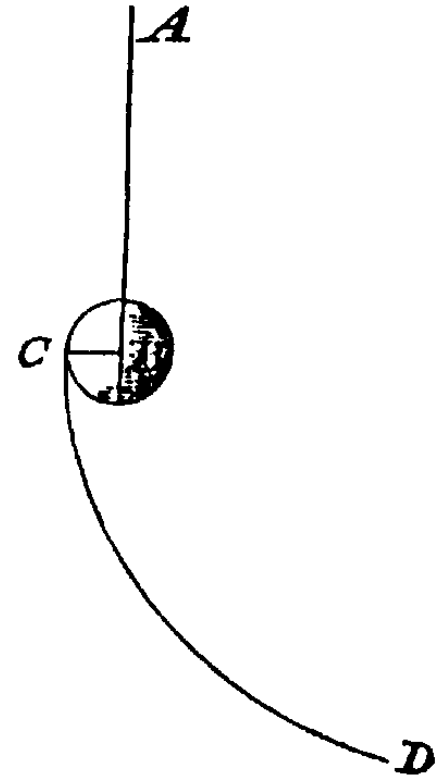
- Однако, измерять «стремление» шара расстоянием, на которое он падает за конечное время, будет неверно.
- Пусть шар, подвешенный на нити, касается гладкой изогнутой поверхности в точке *C*, в которой поверхность вертикальна. В этом случае начало движения шара будет точно таким же, как в случае, когда поверхность целиком вертикальна, т.е. не изгибается.
- Однако, если шар находится ниже, не на вертикальной, а на вогнутой части поверхности, то он будет падать медленнее.
- Поэтому, если мы хотим оценить стремление шара посредством движения, реализуемого при его отделении от нити, то для этого надо найти величину перемещения, происходящего в бесконечно малый промежуток времени сразу после отделения шара от нити.



## Рождение современного понятия силы (Х. Гюйгенс. «О центробежной силе»)

Гюйгенс:

«Если мы хотим изучить это стремление к движению, то нам не нужно рассматривать, что произойдет с телом некоторое время спустя после отделения от нити, а надо рассмотреть возможно меньший промежуток времени, начиная от начала движения».



## Гюйгенс. Рождение современного понятия силы

Х. Гюйгенс. «О центробежной силе»

Декарт «Первоначала философии»

«Рассмотрим теперь какое и с какой силой стремление удалиться от центра имеют тела, прикрепленные к вращающейся нити или колесу».

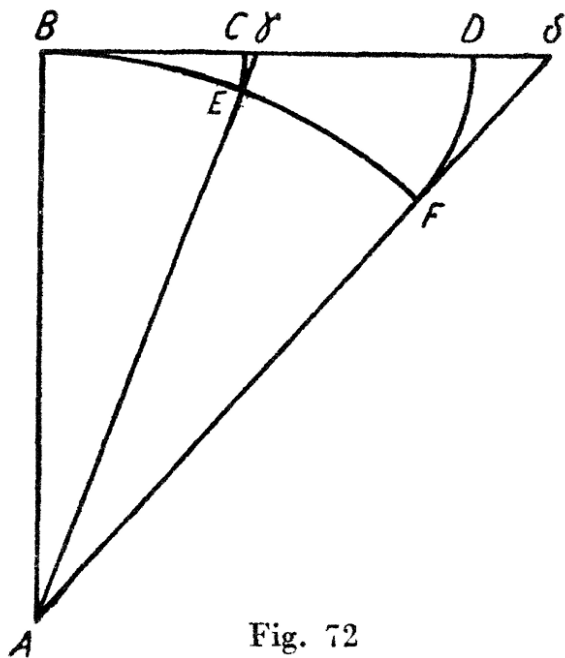
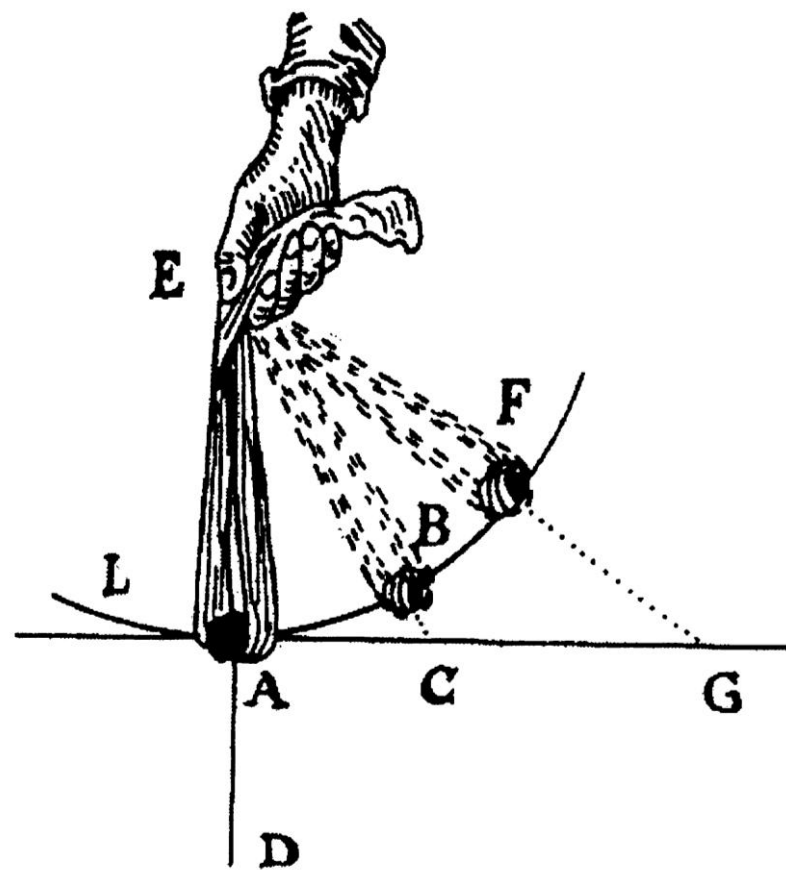
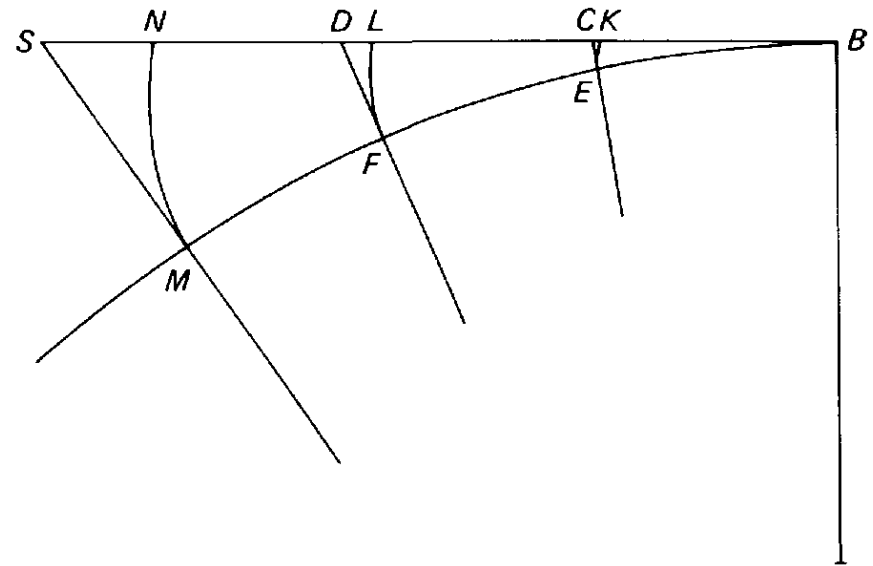


Fig. 72



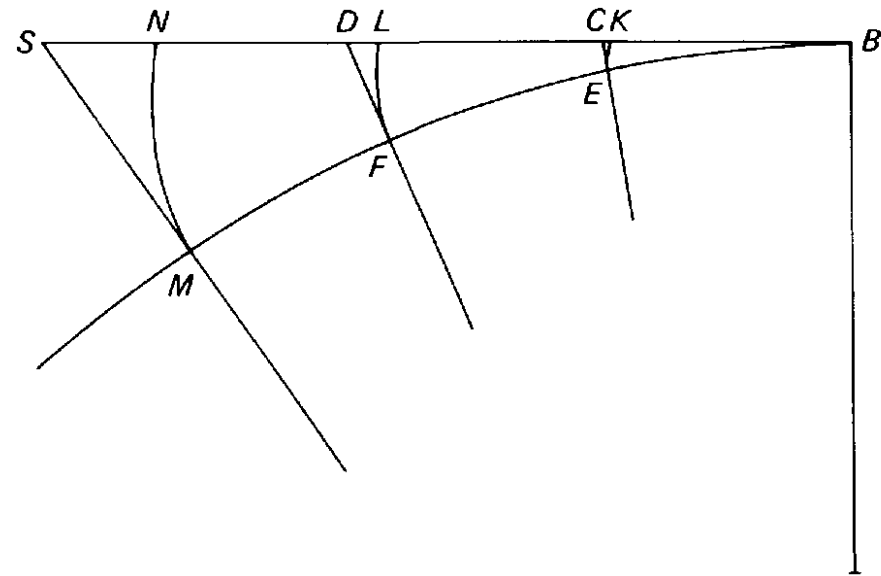
## Рождение современного понятия силы (Х. Гюйгенс. «О центробежной силе»)

- Все рассуждения ведутся в системе отсчета, связанной с «колесом», которое вращается в горизонтальной плоскости вокруг точки  $O$  (на рисунке не изображена). Наблюдатель находится на «колесе».
- По закону инерции, после отрыва от колеса в точке  $B$  шар будет двигаться по касательной  $BS$  с постоянной скоростью: в равные бесконечно малые промежутки времени он будет проходить равные бесконечно малые расстояния  $BC$ ,  $CD$  и  $DS$ .
- По отношению к наблюдателю, находящемуся на колесе, шар будет удаляться: на расстояние  $EC$  (за один отрезок времени), на расстояние  $FD$  (за два отрезка времени), на расстояние  $MS$  (за три отрезка времени) и т.д..



## Рождение современного понятия силы (Х. Гюйгенс. «О центробежной силе»)

- Найдем закон возрастания величин расстояний  $EC$ ,  $FD$ ,  $MS$ .
- Обозначим  $CB$  – через  $d$ , а  $EC$  через  $\delta$ . Пусть радиус колеса равен  $R$ . Три величины  $d$ ,  $\delta$  и  $R$  будут связаны соотношением  $(R + \delta)^2 - R^2 = d^2$ . Пренебрегая членом  $\delta^2$ , получаем  $2R\delta = d^2$  или  $EC = \delta = d^2/2R$ .
- Аналогично получаем  $FD = (2d)^2/2R$  и  $MS = (3d)^2/2R$ . Таким образом, величины  $EC$ ,  $FD$ ,  $MS$  будут приблизительно возрастать как последовательность квадратных чисел 1, 4, 9 ... Чем короче дуги  $BK$ ,  $KL$ ,  $LN$ , тем точнее будет это соответствие.
- Вывод: «стремление» шара к движению (*conatus*) после отрыва от колеса подобно «стремлению» к падению тяжелого тела, подвешенного на нити после отрыва от нее.





## Понятие тяжести и центробежной силы по Х. Гюйгенсу

### «О центробежной силе» (1703)

#### Гюйгенс:

«Отсюда мы заключаем, что центробежные силы разных тел, движущихся по одинаковым кругам с одинаковой скоростью, относятся друг к другу, как веса тел или как количества материи.

Как все весомые тела стремятся падать вниз с одинаковой скоростью и одинаковым ускоренным движением, и притом это стремление обладает тем большей силой, чем они больше, так должно быть и с теми телами, которые стремятся удалиться от центра, так как их стремление, как мы показали, совершенно подобно тому, которое происходит от тяготения.

Но в то время как стремление падать у одного и того же шара всегда одно и то же, всякий раз, когда он подвешен на пути, центробежное стремление— разное, в зависимости от скорости вращения. Остается еще исследовать величину стремления в зависимости от скорости. Сначала мы определим, с какой скоростью надо вращать колесо, чтобы натяжение нити шаром было бы такое же, какое получается при подвешивании того же шара на нити».

Понятие тяжести и теория центробежной силы Х. Гюйгенса  
«О центробежной силе» (1703)

Предложение V

«Если тело движется по кругу с той скоростью, которую оно приобретает при падении с четвертой части поперечника (т.е. диаметра круга), то оно обладает стремлением удалиться от центра равным тяжести, т. е. оно тянет нить с той же силой, как если бы было к ней подвешено».

Тем самым исчерпывающим образом показана параллель между двумя разнородными «стремлениями». По сути, Гюйгенс сопоставил центробежную силу с силой тяжести, показав возможность их количественного сравнения.

Это пример того, как особая сила – сила тяжести – становится количественным эквивалентом для выражения сил иной природы.

## Тема. 2

Гипотеза обратных квадратов Р. Гука и теория тяготения И. Ньютона

Роберт Гук (1635-1703) — английский ученый-энциклопедист, естествоиспытатель



## Роберт Гук (1635-1703)

- Р. Гук был из семьи священника, имел незаурядные способности, феноменальную память.
  - В 1653 году поступил в Оксфордский университет, где проявил способности к физике и химии. Впоследствии он стал ассистентом Р. Бойля.
  - В 1662 г. - магистр искусств Оксфордского университета
  - В 1663 г. - создал устав для Лондонского королевского общества, стал его членом (был куратором в течение 40 лет). Еженедельные заседания. Обязанность Гука – готовить к заседаниям 3-4 опыта, доказывающие новые законы природы
  - 1665 г. - профессор в Лондонском университете.
  - В 1677-1683 — секретарь Лондонского Королевского общества..
  - В 1659 году он построил воздушный насос, в 1660 году совместно с Х. Гюйгенсом установил точные температуры таяния льда и кипения воды.
- Сконструировал зеркальный телескоп, прибор для измерения силы ветра, машину для деления круга.

## Роберт Гук (1635-1703)

- В 1665 г. увидел свет важнейший труд Гука «Микрография», в котором детально излагались способы применения микроскопа для разнообразных научных исследований.
- В 1660 гг. Гук сформулировал закон пропорциональности между силой, приложенной к упругому телу, и его деформацией (закон Гука).
- Он также дал общую картину движения планет.
- Открытия Гука позволили создать пружинный механизм для карманных часов.
- Гук – талантливый архитектор. По его проектам было построено несколько зданий, главным образом в Лондоне. «Арка Гука». Последним изобретением Гука был морской барометр.
- 3 марта 1703 года Роберт Гук скончался.

## Создание теории всемирного тяготения. Роберт Гук.

- В 1661 г. в Лондоне была образована комиссия для изучения природы тяжести, в которую вошли Р. Бойль, Р. Гук и другие. В 1666 г. Гук доложил о проделанных им опытах, в которых он пытался установить убывание тяжести с возрастанием высоты над поверхностью Земли. Опыты оказались неубедительными, хотя основная идея была плодотворной.
- Спустя два месяца Гук выступил с новым докладом, в котором утверждал, что Солнце должно обладать некоторым притягивающим свойством по отношению к планетам. Интересна его аналогия между движениями грузика конического маятника и планеты по ее орбите. Стремление грузика и планеты продолжать начатое движение по прямой (по свойству инерции) нарушается притягивающим изгибающим началом: у грузика — натяжением нити, у планеты — притяжением Солнца. Гук утверждал, что на основе предположения о притягивающем свойстве можно было бы по двум-трем положениям планет рассчитать их орбиты и движение. Однако такая программа не была выполнимой для самого ее автора; будучи проницательным и остроумным экспериментатором, Гук не был математиком.
- В 1665 г. И.Ньютон вынужденно жил на своей ферме Вулсторп (по причине чумы). Здесь в спокойной обстановке он впервые провел расчет, в котором фигурировала **сила (или стремление), обратно пропорциональная квадрату расстояний.**

## Создание теории всемирного тяготения. Роберт Гук.

В 1674 г. Гук опубликовал мемуар «Попытка доказательства годичного движения на основе наблюдений». Здесь он подходит к истине еще ближе, резюмируя сочинение следующими тремя положениями.

- ❑ Не только Солнце притягивает планеты, но и планеты притягивают Солнце и друг друга.
- ❑ Приведенное в движение тело движется по прямой до тех пор, пока притягивающее изгибающее начало не отклонит его от прямолинейного движения, после чего оно будет вынуждено двигаться по окружности или эллипсу
- ❑ Притягивающее действие тем больше, чем ближе тело к центру притяжения. Что касается степени убывания этой силы, то она не определена им на опыте. Как только зависимость силы от расстояния станет известной, астрономы смогут найти законы небесных движений.

В 1679 г., став секретарем Королевского общества, Гук обратился к Ньютону с письмом, где спрашивал его мнение о своих гипотезах. Ньютон уклонился от дискуссии, сказав, что в последние годы он был далек от «философии» и ничего не слышал о гипотезах Гука.



## Закон обратных квадратов.

Ответное письмо Р. Гука Ньютону (6 января 1680 г.):

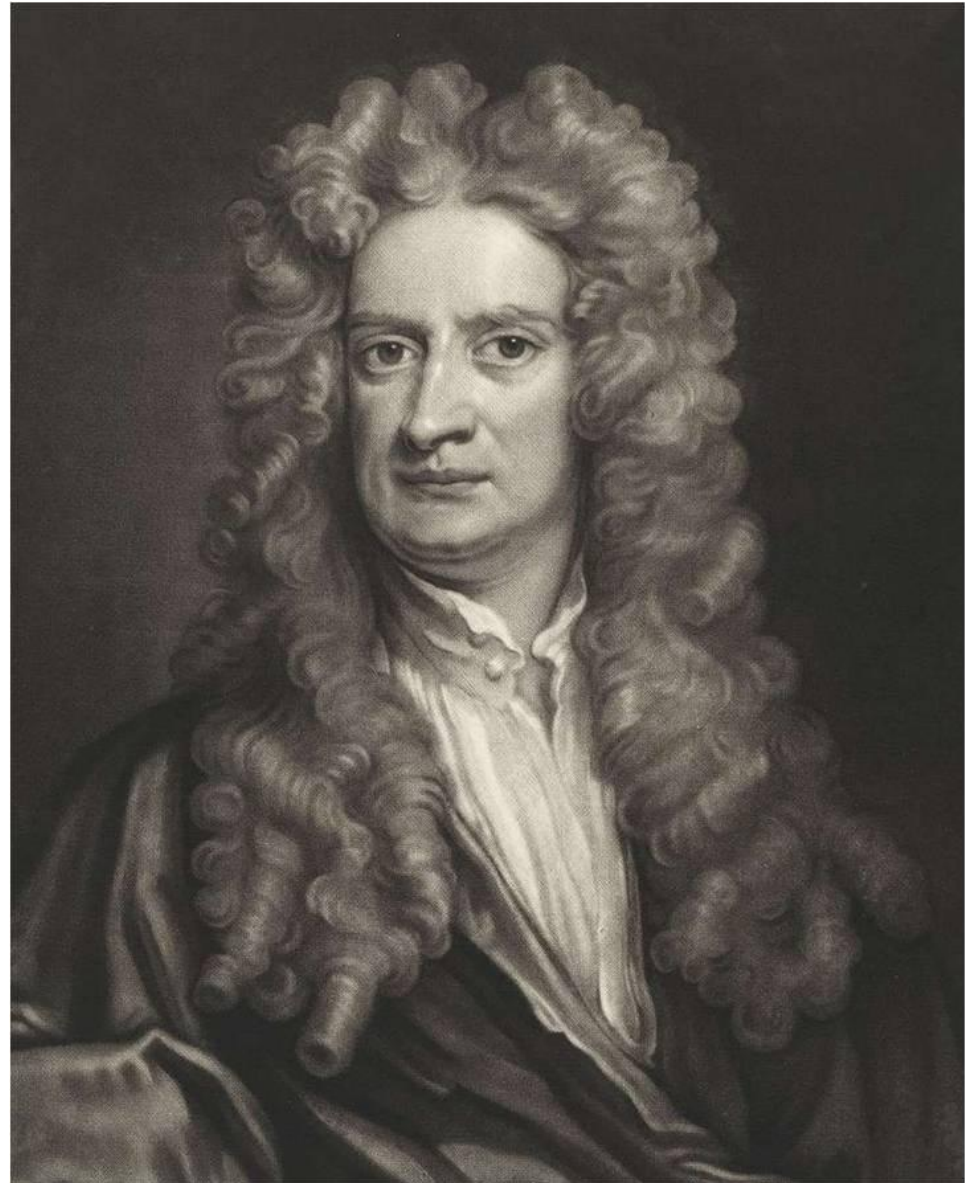
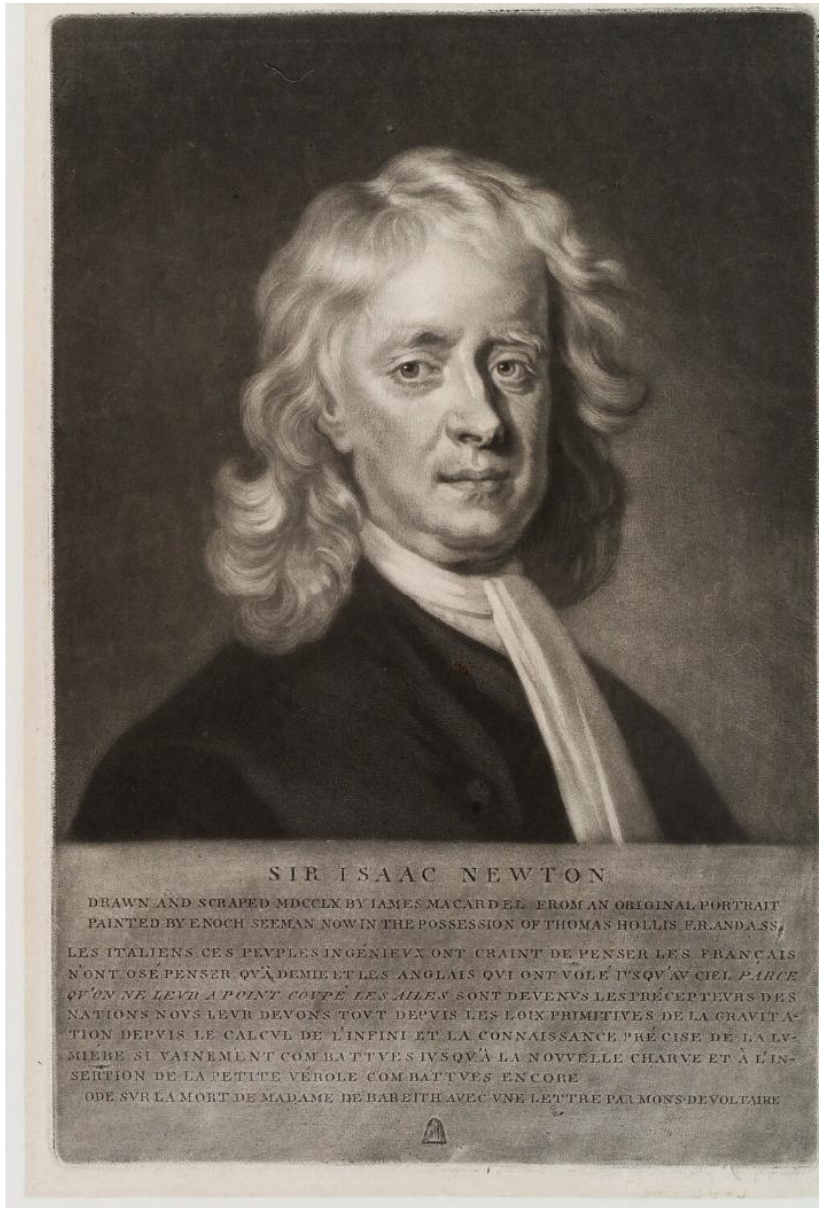
«Я предполагаю, что *притяжение обратно пропорционально квадрату расстояния до центра*, соответственно предположению Кеплера о зависимости скорости от расстояния. Галлей, вернувшись с острова св. Елены, рассказал мне, что маятник качается медленнее на вершине горы, чем у подножья, и не мог понять причины. Я сказал ему, что он решил давно занимавший меня вопрос об убывании тяготения с удалением от центра... Говоря о падении внутри Земли, я не думаю что закон притяжения будет таким же до самого центра Земли, но, напротив, я считаю, что, чем ближе тело будет к центру, тем слабее будет притяжение, возможно, подобно тому, как это происходит с маятником или телом внутри вогнутой поверхности, где сила уменьшается по мере приближения к нижней точке... Притяжение на значительных расстояниях [от небесных тел] можно вычислять по указанной пропорции [обратных квадратов] как притяжение самим центром».

В этом же письме он – проведя необходимые вычисления – Гук высказал мысль, что орбиты планет похожи на эллипсы (он называл их эллиптоиды). Доказать их эллиптичность Гук не смог.

### Тема 3.

Трактат И. Ньютона «Математические начала натуральной философии».  
Полемика картезианцев и ньютоналинцев

# ИСААК НЬЮТОН (1643–1727)



## ИСААК НЬЮТОН

- Исаак Ньютон родился 4 января 1643 г. (25 декабря 1642 г. по старому стилю) в фермерской семье. Отец умер до рождения сына. Из-за перемен в семье (когда ему было 13 лет, умер его первый отчим) Ньютону пришлось прервать учебу в школе.
- В 18 лет поступил в Тринити-колледж в Кембридже. Двадцатилетнему Ньютону его учитель И. Барроу уступил свою кафедру. В это время Ньютон углубленно занимался оптикой и химией.
- С сер. 1660 гг. под влиянием Р. Гука начинает работу над проблемами тяготения и математической теорией движения. Результатом стала публикация трактата «Математические начала натуральной философии» (1687).
- В конце XVII в. Ньютон становится «хранителем» Королевского монетного двора (Master of Mint).
- В 1699 г. избран иностранным членом Парижской Академии наук.
- В 1703 г. – президентом Лондонского Королевско-го общества (членом которого он был с 1672 г.).
- Вскоре он был возведен в дворянское достоинство.
- Умер Ньютон 20 марта 1727 г.

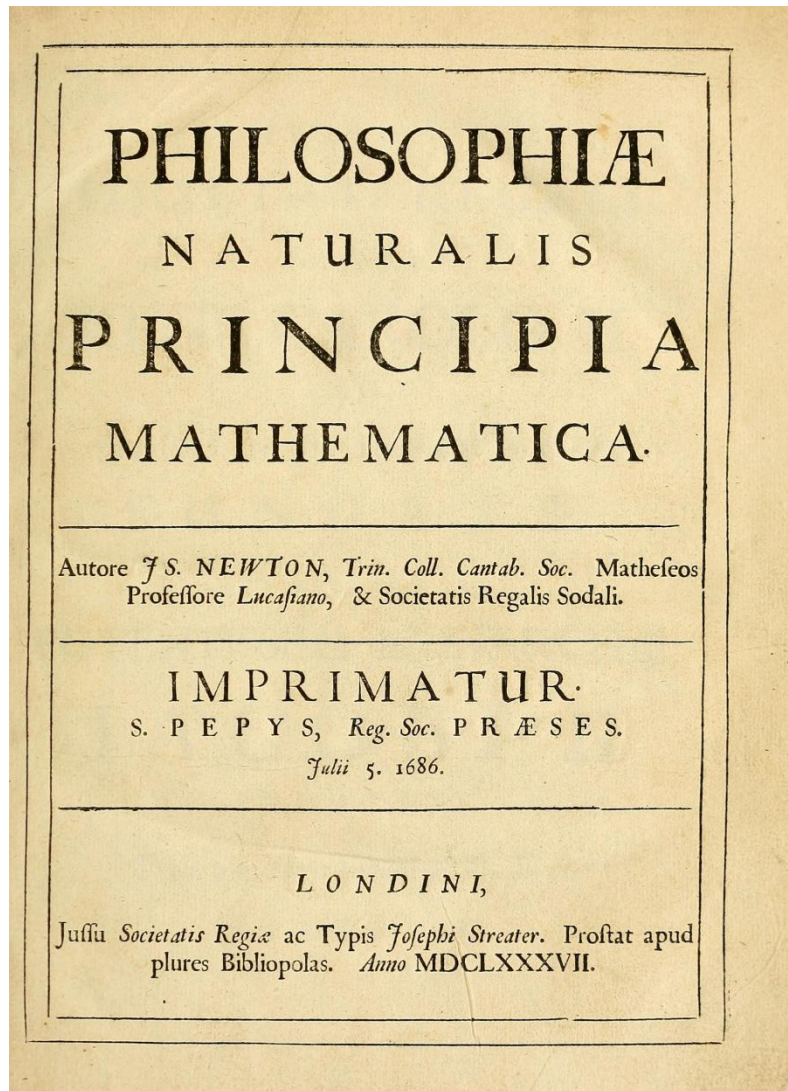
## ОСНОВНЫЕ ТРУДЫ НЬЮТОНА

1. «Метод флюксий» (1671) (опубликован в 1736 г.)
2. «Новая теория света и цветов» (1672) (сообщение Королевскому обществу)
3. «Движение тел по орбите» (1684)
4. «Математические начала натуральной философии» (1687)
5. «Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света» (1704)
  - «О квадратуре кривых» (приложение к «Оптике»)
  - «Перечисление линий третьего порядка» (приложение к «Оптике»)
6. «Универсальная арифметика» ( 1707)
7. «Анализ с помощью уравнений с бесконечным числом членов» (1711)
8. «Метод разностей» (1711)

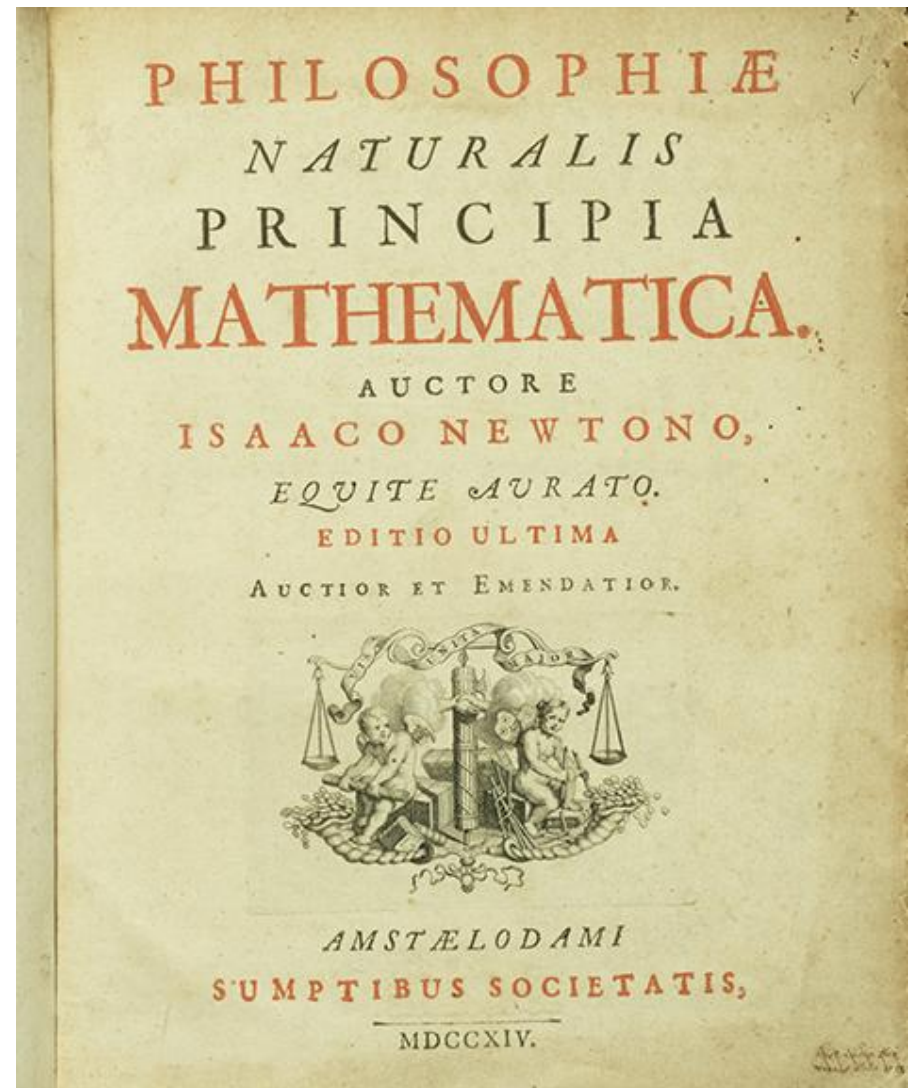


# И. Ньютон. «Математические начала натуральной философии»

Первое издание (1687)



Второе издание (1714)



## «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ» (1687)

Трактат состоит из трех книг, которым предпосланы три небольших по объему, но весьма важных по содержанию раздела: «Предисловие автора», «Определения», «Аксиомы, или законы движения».

В «Предисловии» Ньютон формулирует цель трактата: «дать тщательное развитие приложений математики к физике» (физика и натуральная философия для Ньютона синонимы).

«Древние рассматривали механику двояко: как *рациональную* (умозрительную), развиваемую точными доказательствами, и как *практическую*. К практической механике относятся все ремесла и производства, именуемые механическими, от которых получила свое название и самая *механика*.

Так как ремесленники довольствуются в работе лишь малой степенью точности, то образовалось мнение, что механика тем отличается от геометрии, что все вполне точное принадлежит к геометрии, менее точное относится к механике. Но погрешности заключаются не в самом ремесле или искусстве, а принадлежат исполнителю работы: кто работает с меньшей точностью, тот – худший механик, и если бы кто-нибудь смог исполнять изделие с совершеннейшею точностью, тот был бы наилучшим из всех механиков».

Таким образом, по Ньютону, статус практической механики столь же высок, как и статус геометрии.

## «Математические начала натуральной философии» – теоретический трактат

- Несмотря на высокую оценку практической механики, в Ньютон не собирался писать трактат о «ремеслах», об усилиях, «производимых руками».
- Его произведение носит ярко выраженный теоретический характер, оно посвящено исследованию «сил природы» методами математики.
- Ньютон предупреждает: «Будем, главным образом, заниматься тем, что относится к тяжести, легкости, силе упругости, сопротивлению жидкостей и к тому подобным притягательным или напорающим силам. Поэтому и сочинение это нами предлагается как математические основания физики. Вся трудность физики ... состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления».
- Это – программа математизации физики. В трактате она реализована в отношении движений небесных тел. Но автор верит («многое заставляет меня предполагать»), что «и остальные явления природы» можно «вывести из начал механики».



## И. Ньютон. Центробежное ускорение

Тело вращается по окружности радиуса  $R$   
с постоянной скоростью  $v$ .

При отделении от окружности в т.  $M$   
тело начинает двигаться по касательной.

За бесконечно малый промежуток времени  $\delta t$   
оно проходит расстояние  $MA = v \cdot \delta t$ .

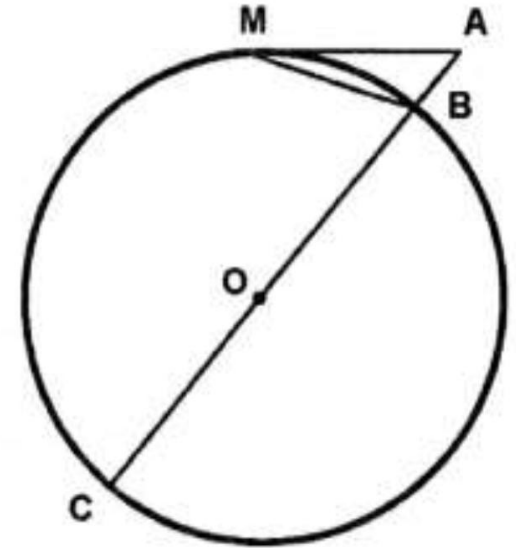
При этом  $AB = \frac{a(\delta t)^2}{2}$  (результат Гюйгенса)

По теореме о касательной и секущей  
 $MA^2 = AB \cdot AC$ .

$$v^2 \cdot (\delta t)^2 = \frac{a(\delta t)^2}{2} \cdot \left( 2R + \frac{a(\delta t)^2}{2} \right)$$

$$v^2 = a \cdot R$$

$$\text{Откуда } a = \frac{v^2}{R}$$



«Математические начала натуральной философии» (1687).

## Доказательство закона обратных квадратов

Закон обратных квадратов Ньютон доказал для движений тела по каждому из трех конических сечений.

### Предложение XI. Задача VI.

Тело обращается по эллипсу; требуется определить закон центростремительной силы, направленной к фокусу эллипса.

### Предложение XII. Задача VII.

Тело обращается по гиперболу; требуется определить закон центростремительной силы, направленной к фокусу этой кривой.

### Предложение XIII. Задача VIII.

Тело обращается по параболе; требуется определить закон центростремительной силы, направленной к фокусу этой кривой.

Во всех тех случаях центростремительная сила обратно пропорциональна квадрату расстояния тела до фокуса.

# «Математические начала натуральной философии» (1687).

## Центральная теорема

### Следствие 1 (из предложений XI – XIII)

«Из последних трех предложений следует, что если какое-нибудь тело  $P$  выходит из места  $P$  по направлению прямой  $PR$  с какой-либо скоростью и находится под действием центростремительной силы, обратно пропорциональной квадратам расстояний до центра  $S$ , то это тело будет двигаться по коническому сечению, коего фокус лежит в центре сил, и наоборот; ибо при заданных: фокусе, точке касания и положении касательной можно построить лишь одно коническое сечение, имеющее в этой точке заданную кривизну».

На деле, прямую теорему Ньютон не доказал, а только сформулировал.

Ее аналитическое доказательство (в котором частично использовались еще геометрические методы) было дано в 1710 г. Я. Германом, И. Бернулли и П. Вариньоном. В этом доказательстве использовалась геометрически доказанная Ньютоном «теорема площадей» (2-ой закон Кеплера).

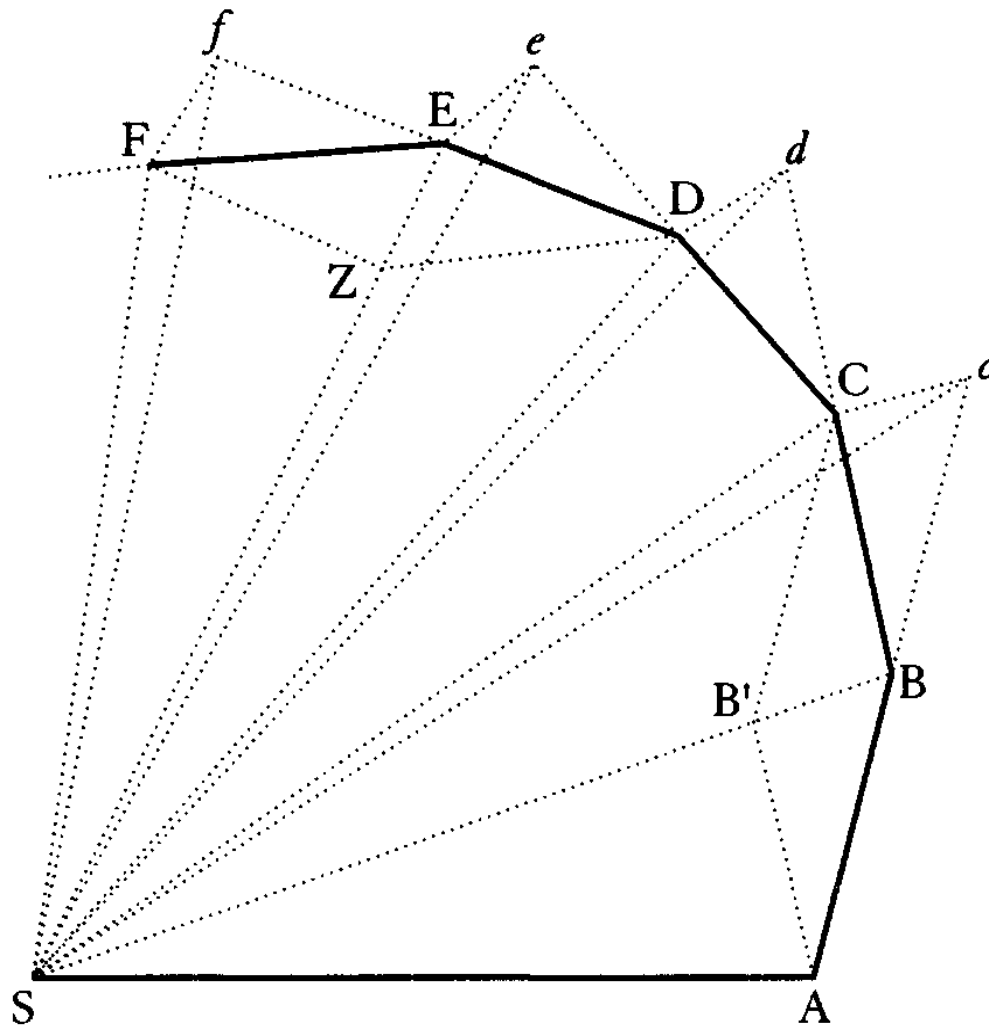
«Теорема площадей» (2-ой закон Кеплера).

И. Ньютон, «Математические начала натуральной философии» (1687).

Кн. I. Предложение I.

Аналитическое доказательство этой теоремы было получено только в 1740-х гг.

(Д. Бернулли, Л. Эйлер, А.-К. Клеро)



## Полемика ньютонианцев и картезианцев

- ❑ Оставался еще один пробел в системе воззрений Ньютона: в чем состоит механизм тяготения? Именно по вопросу о природе тяжести и тяготения картезианцы XVIII в. атаковали ньютонианцев.
- ❑ Картезианская физика каждому явлению отыскивала какие-нибудь механические схемы («механизм» явления), подчас гипотетические ...
- ❑ Картезианская идеология сыграла большую роль в становлении новых областей современной физики.
- ❑ Создатели теории теплопроводности в XIX в. опирались на представление об особом материальном носителе тепла – теплороде.
- ❑ Создатели теорий электромагнетизма – на представление об эфире.

Л.И. Мандельштам, «Лекции по оптике».

## Ньютон о дальном действии

Передача силового воздействия от тела к телу через пустоту казалась и самому Ньютону парадоксальной:

«Непостижимо, — читаем в одном из его писем, — чтобы неодушевленная грубая материя могла без посредства чего-либо нематериального действовать и влиять на другую материю без взаимного соприкосновения, как это должно бы происходить, если бы тяготение в смысле Эпикура было существенным и врожденным в материи.

Предполагать, что тяготение является существенным, неразрывным и врожденным свойством материи, так что тело может действовать на другое на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо передавая действие и силу, — это, по-моему, такой абсурд, который немислим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах.

Тяготение должно вызываться агентом, постоянно действующим по определенным законам. Является ли, однако, этот агент материальным или нематериальным, решать это я предоставил моим читателям».