

# **История и методология механики**

Евгений Алексеевич Зайцев  
e\_zaitsev@mail.ru

Лекция № 17

## План лекции

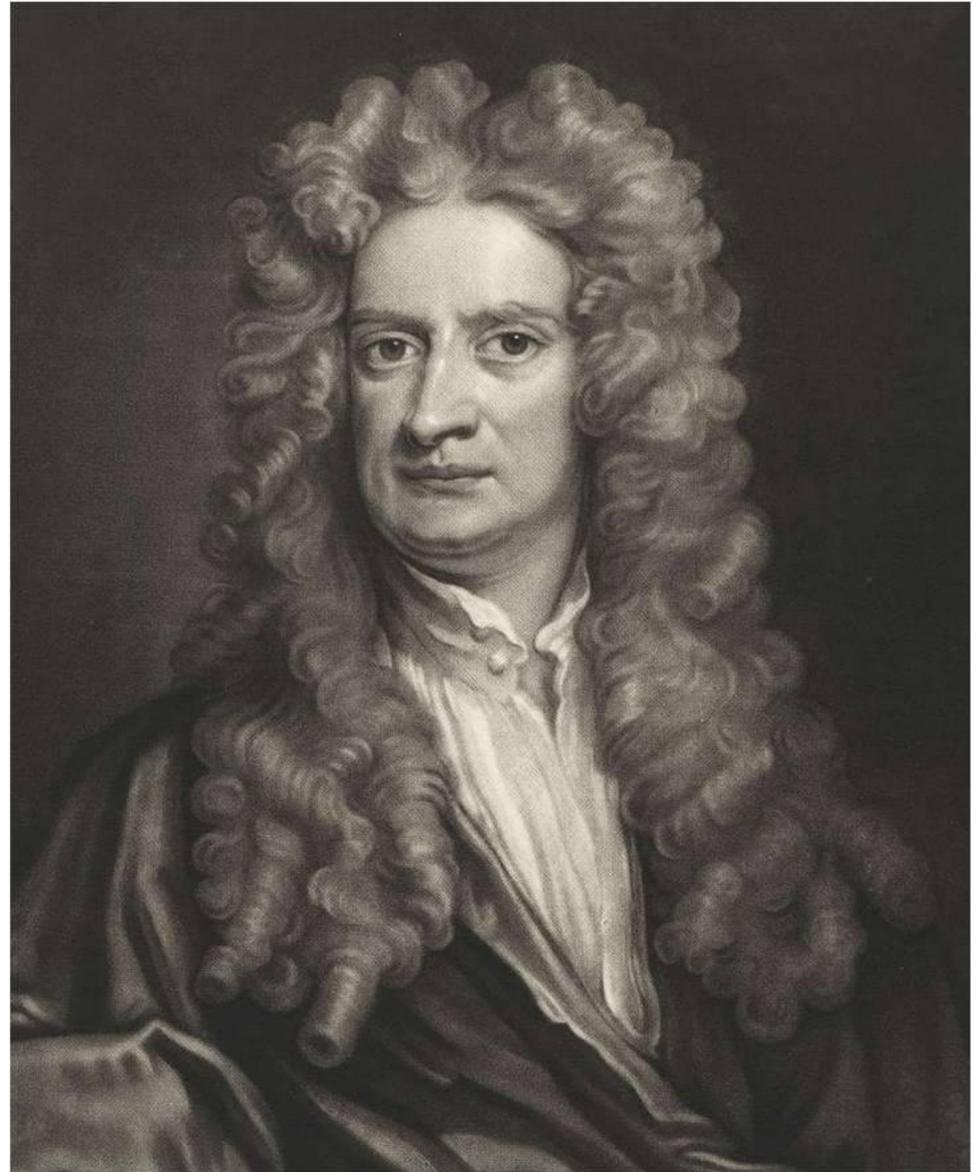
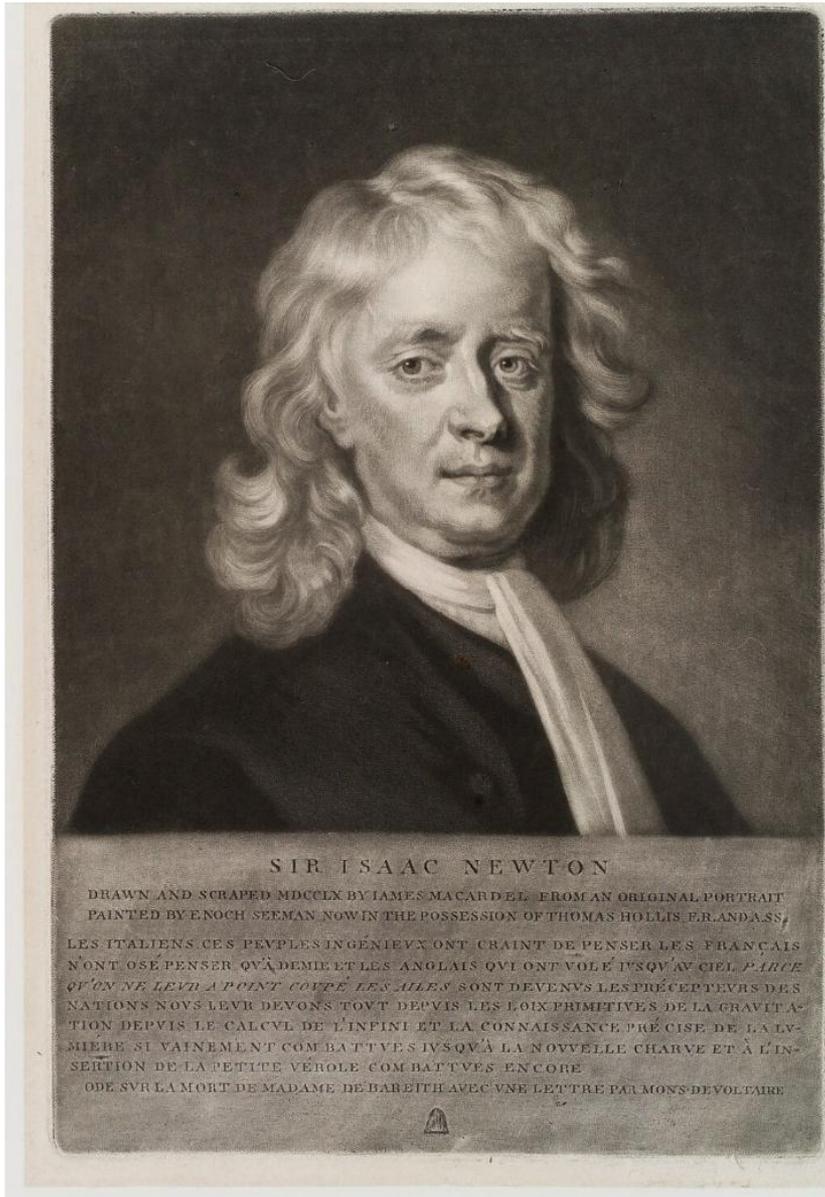
### Тема. 1

Трактат И. Ньютона «Математические начала натуральной философии»  
Книга 2 «О движении тел»

### Тема. 2

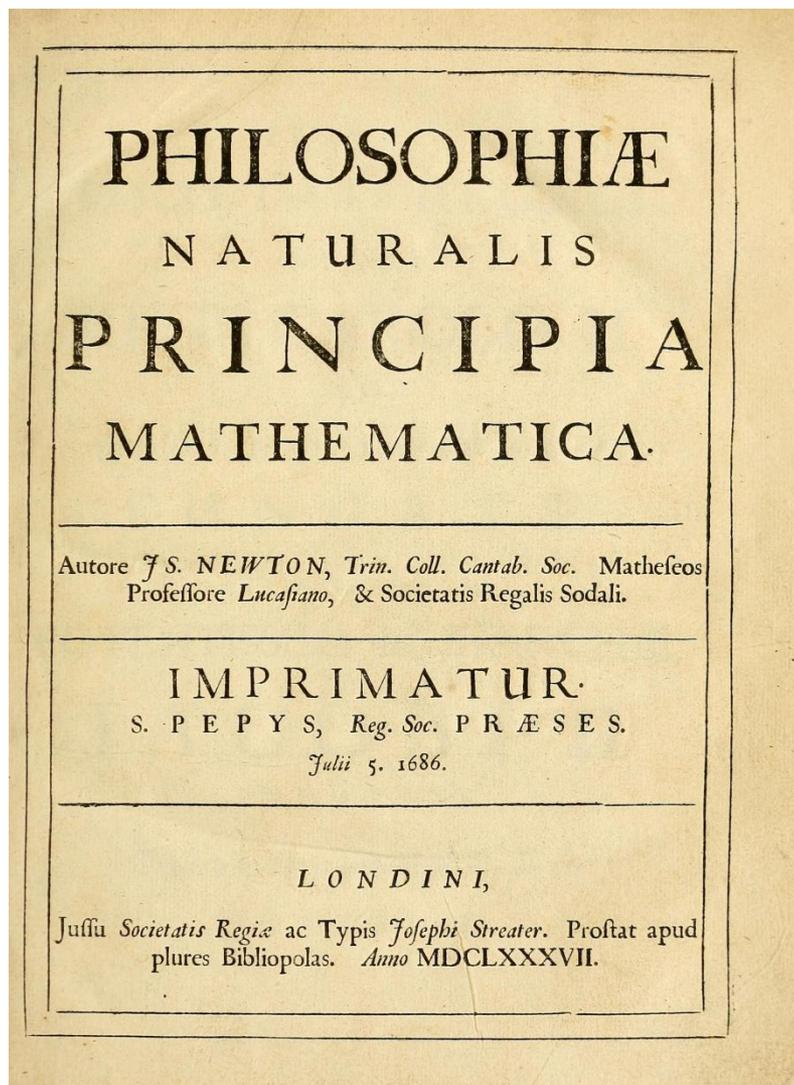
Трактат И. Ньютона «Математические начала натуральной философии»  
Книга 3 «О системе мира»

# ИСААК НЬЮТОН (1643–1727)

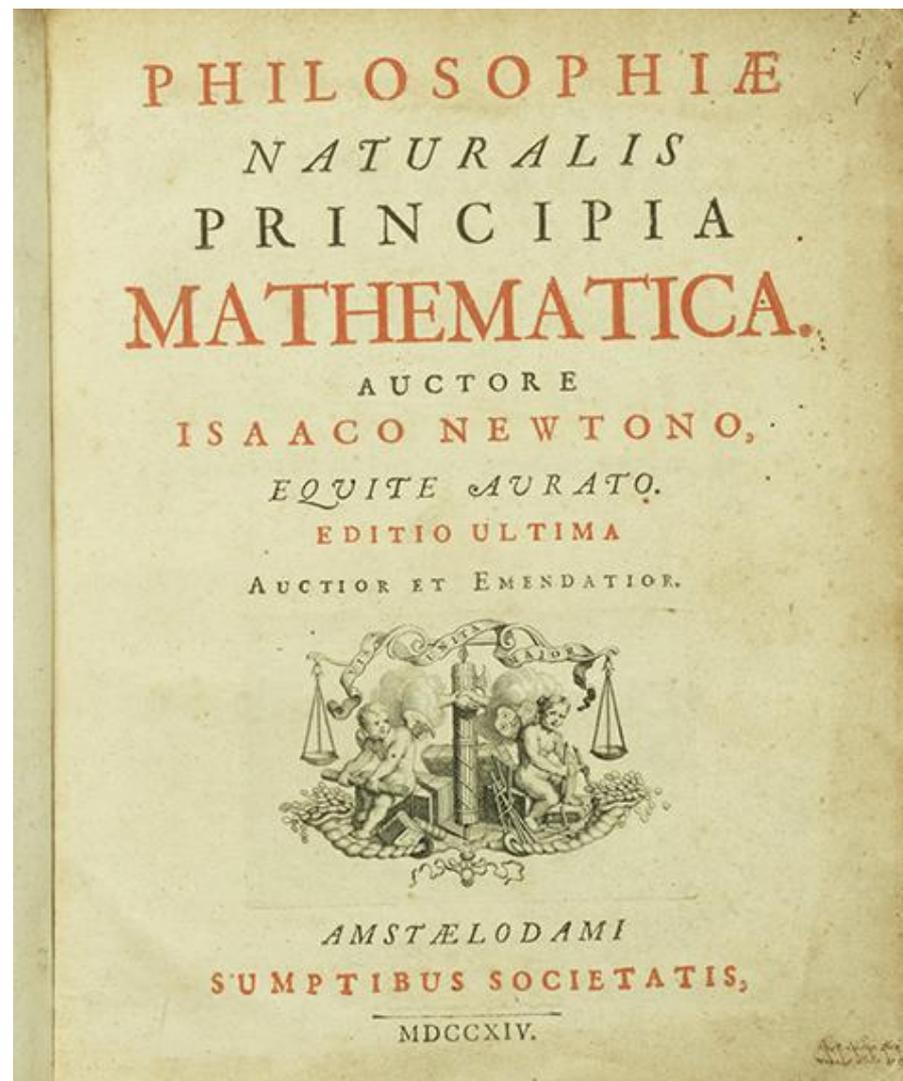


# И. Ньютон. «Математические начала натуральной философии»

Первое издание (1687)



Второе издание (1714)



## Клиффорд Трусделл

о структуре «Математических начал натуральной философии» И. Ньютона

«Начала» Ньютона — это шедевр, который сегодня уже не читают...

В первой книге содержится почти все, чем славится это произведение. В ней Ньютон проявляет, однако, *мало оригинальности*; ее основное достоинство состоит в строго математическом упорядочивании предшествующих результатов и выводе их из минимума (исходных) предположений.

Вторая книга, посвященная движению в жидкости, напротив, почти *полностью оригинальна* и почти полностью ... неверна. Дедуктивный метод, столь характерный для первой книги, здесь не применяется — каждый новый ход мысли сопровождается выдвиганием новой гипотезы. Здесь раскрывается высший творческий гений Ньютона. Полученные им решения, безусловно, неверны; однако, он первым указал на эти важные проблемы и осмелился заняться ими. Его работа доминировала в механике жидкостей в течение последующего столетия. Отказ от дедуктивного метода при переходе к жидкостям был обусловлен не желанием Ньютона, а необходимостью.

В третьей книге Ньютон демонстрирует третье великое качество, а именно способность получать важные численные результаты в важных частных случаях».

C. Truesdell, Zur Geschichte des Begriffs "Innerer Druck" // Phys. Blätter (1956). S. 315-326.

# Несколько слов о законах движения кн. 1.

## Прямолинейная и круговая инерция

«Математические начала натуральной философии» (1687)

### 1. *Прямолинейная инерция:*

«**Закон 1:** Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние.

Брошенное тело продолжает удерживать свое движение, поскольку его не замедляет сопротивление воздуха и поскольку сила тяжести не побуждает это тело вниз».

### 2. *Круговая инерция*

«Волчок, коего части, вследствие взаимного сцепления, отвлекают друг друга от прямолинейного движения, не перестает вращаться (равномерно), поскольку это вращение не замедляется сопротивлением воздуха. Большие же массы планет и комет, встречая меньшее сопротивление в свободном пространстве, **сохраняют свое** как поступательное, так и **вращательное движение** в продолжение гораздо большего времени»

# И. Ньютон. Круговая инерция в набросках к «Математическим началам натуральной философии»

## 1. MS. V.

«§ 8. Всякое тело сохраняет одно и то же реальное количество **кругового движения** и [одну и ту же] скорость до тех пор, пока ему не противостоят другие тела».

“§ 8. Every body keeps the same real quantity of circular motion and velocity so long as tis not opposed by other bodies.”

## 2. MS. Xa (Определения и законы движения)

«**Закон 1.** Своей врожденной силой (*vi insita*) всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами (*viribus impressis*) изменять это состояние. Но само это равномерное движение – двойственно: **поступательное движение по прямой линии**, которую описывает центр тела своим равномерным перемещением, и **круговое движение** вокруг любой из своих осей, которая либо покоится, либо перемещается равномерно, оставаясь всегда параллельной своему начальному положению».

**Предыстория круговой инерции. Галилей.**  
**«Технологический» пример инерциального вращения**  
(вращение мраморной сферы (шара), De motu, 1590)

1. Пример кругового инерциального вращения у Галилея: вращение хорошо отполированной мраморной сферы (шара) «вокруг центра мира», т.е. центра Земли. Поскольку «тяжести», которыми обладают симметричные части сферы, уравновешены, в ее вращении нет насилия, и поэтому оно может продолжаться вечно. Вращение **тяжелой** сферы вокруг центра мира – самый ранний вариант инерциального движения у Галилея.

2. Следующий пример, рассмотренный Галилеем – вращение вокруг оси тяжелой сферы, центр которой не совпадает с центром Земли.

Такое движение является «смешанным» – состоящим из естественного и насильственного. Одни части сферы приближаются к центру мира, а другие удаляются от него.

Галилей ставит вопрос об инерциальности такого движения-вращения, но оставляет его открытым.

3. Инерциальное вращение сферы и «нейтральное движение» (по Галилею)

# «Математические начала натуральной философии»

## Книга 2 «О движении тел»

Во второй книге движение (в отличие от кн. 1) рассматривается в среде, оказывающей сопротивление. Большая часть книги посвящена вопросам аэро- и гидродинамики.

Отделы I, II и III. Ориентированы на задачи внешней баллистики. В них рассматривается теория движения материальной точки в поле силы тяжести при наличии сопротивления движению, пропорционального первой или второй степени скорости, а также при сопротивлении, выражаемом двучленной формулой, содержащей и первую и вторую степень скорости. Практическое значение этой теории могло быть для артиллерии очень велико, ибо количественным учетом влияния сопротивления воздуха мало кто занимался (за исключением Х. Гюйгенса).

[Гюйгенс в работе 1669 г. – оставшейся неопубликованной – исследует случай сопротивления, пропорционального первой степени скорости (довольно успешно), и сопротивления, пропорционального второй степени (получил некоторые качественные результаты, но задачу не решил)]. Dugas, 532-7.

Позднее Д.Бернулли, Л.Эйлер и др. довели эту теорию до приложения в артиллерийской практике (составление таблиц с учетом сопротивления воздуха)

## Баллистика Ньютона (основные результаты)

### «Отдел I. Предложение IV. Задача II

Предполагая, что сила тяжести в какой-либо среде постоянна и направлена перпендикулярно к горизонтальной плоскости, определить движение брошенного в этой среде тела, принимая сопротивление ее пропорциональным скорости». Задача решена правильно.

#### ПОУЧЕНИЕ (конец отд. I)

«Впрочем, предположение, что сопротивление пропорционально скорости, более математическое, нежели соответствующее природе. В срединах, совершенно лишенных твердости, сопротивления телам пропорциональны квадратам скорости, ибо действием более быстро движущегося тела тому же количеству среды во время, во столько раз меньшее, во сколько скорость больше, сообщается во с только же раз большее количество движения; следовательно, в равные времена, вследствие большего количества возмущаемой среды, сообщится количество движения, пропорциональное квадрату скорости, сопротивление же (по II и III законам движения) пропорционально сообщаемому количеству движения».

Полное решение вопроса о траектории в случае сопротивления, пропорционального квадрату скорости, Ньютон найти не смог.

Значение. Применение мощного математического аппарата теории флюксий.

«Математические начала натуральной философии»  
Книга 2. Отделы IV и IX – против теории Декарта.

Отдел IV, носящий название «О круговом обращении тел в сопротивляющейся среде», посвящен вопросу о тех траекториях, которые должны были бы описывать планеты, если бы вокруг Солнца существовала сопротивляющаяся движению межпланетная среда. Траектории получаются не замкнутыми, но спиралевидными, закручивающимися вокруг Солнца (Ньютон доказал это точными расчетами).

Основная цель, которую ставил перед собой Ньютон в этом разделе, состояла в опровержении вихревой гипотезы Декарта.

Поскольку – как установлено Кеплером и теоретически подтверждено самим Ньютоном, планеты движутся по замкнутым эллипсам – мировое пространство не содержит сопротивляющейся среды, и значит гипотеза вихрей Декарта неверна.

Опровержению вихревой гипотезы Декарта, предложенной для объяснения кругообразного движения планет вокруг Солнца, посвящен также (заключительный) отдел IX второй книги.

Предыстория (гидродинамической) теории вихрей Декарта в античной  
космологии

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

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

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

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

Таким же образом мы можем представить себе движение небесных тел.

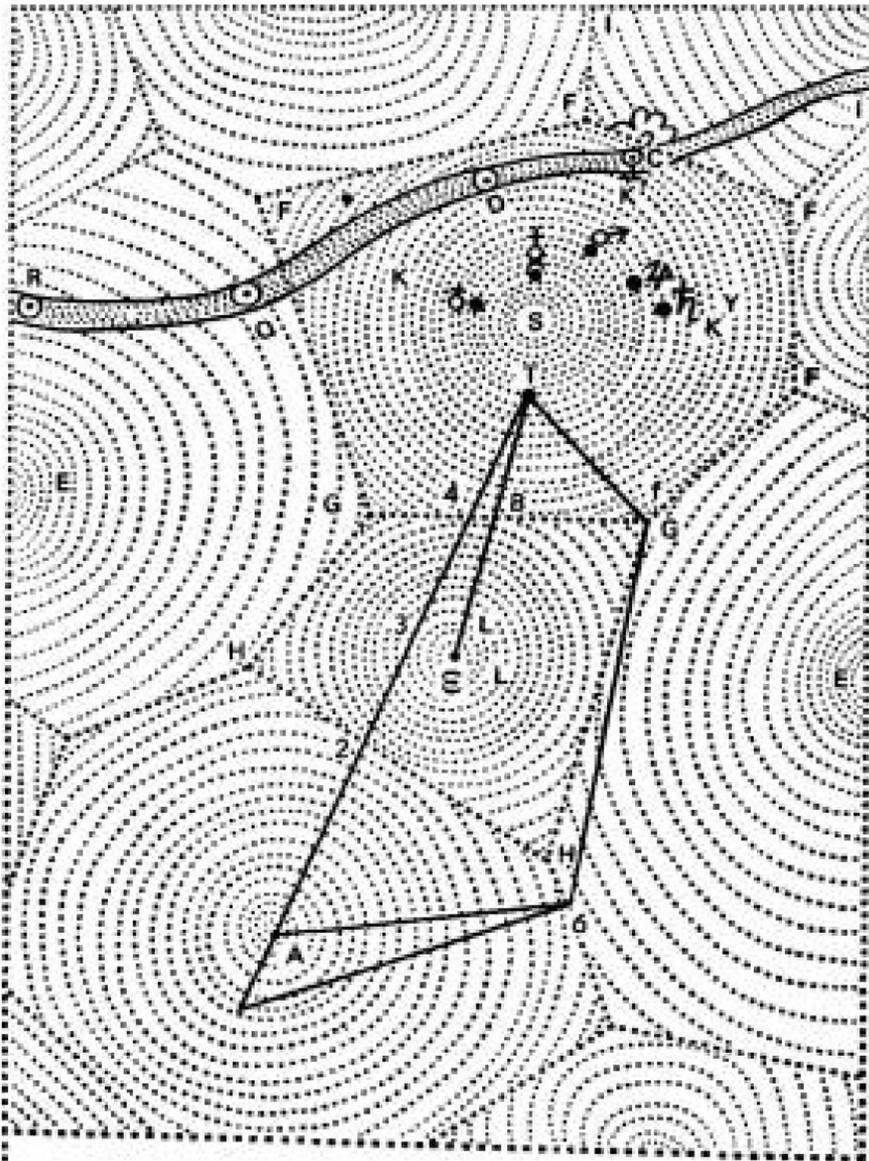
Мы можем полагать, что каждая планета обладает соответствующей жизненной силой и движется сама.

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

Клавдий Птолемей, «Планетарные гипотезы» (2 век н.э.)



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

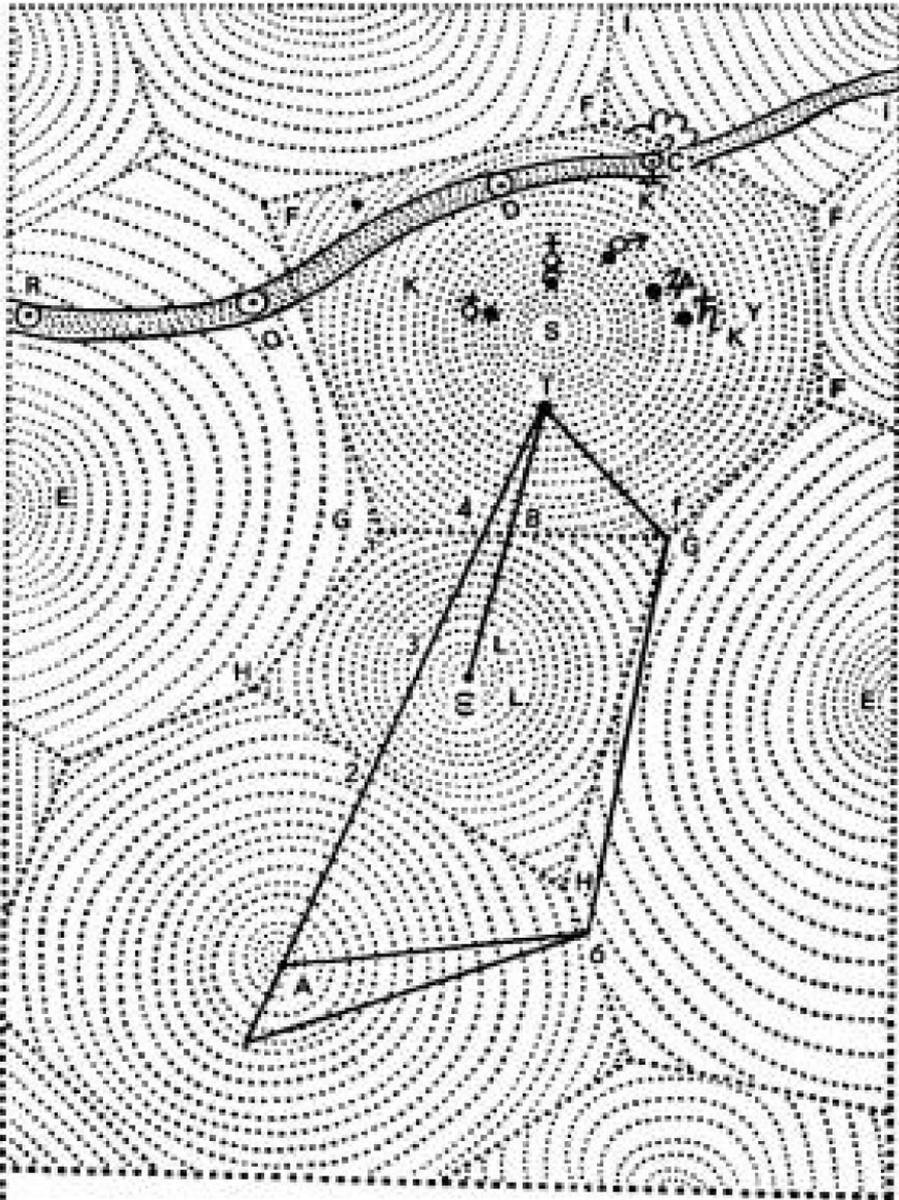


Небесные тела увлекаются материальными водоворотами жидкой, тонкой материи. Поведение планет напоминает поведение тел, переносимых течением воды.

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 занимают верхнюю область. Частицы вихря упорядочены в соответствии с размером: 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 – теория вихревого движения небесных тел



«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».

### Ключевая 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.

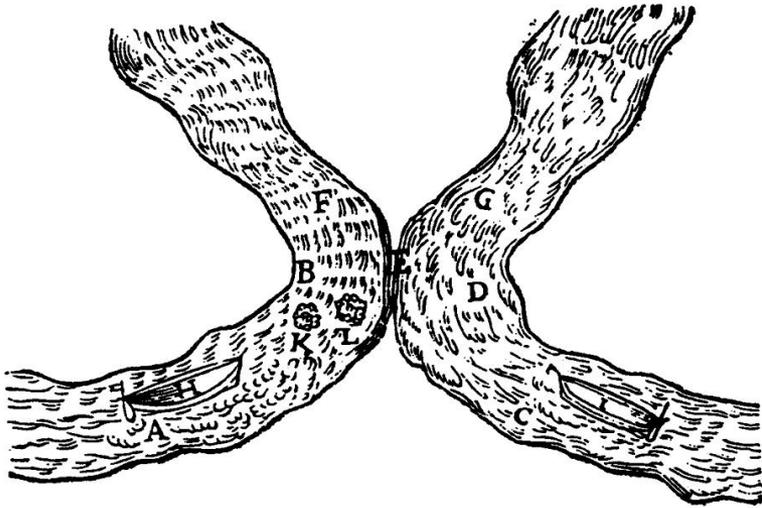
Напротив, очень легкие тела, например белая пена, скопившаяся и плавающая на поверхности рек во время бури, обладают такой способностью в значительно меньшей степени».

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

«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.

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 ...

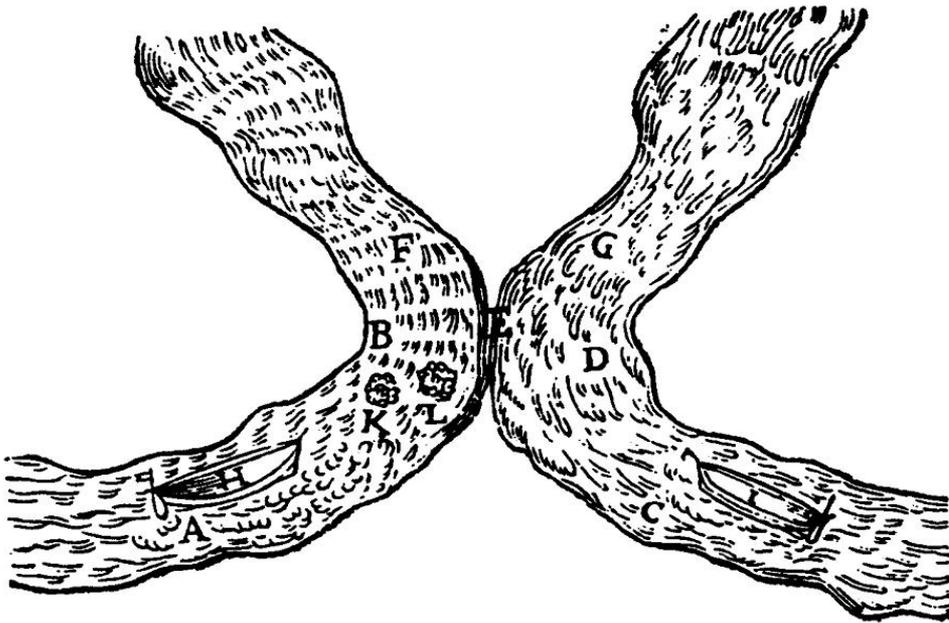


Почему планеты остаются внутри вихря,  
а кометы переходят из одного вихря в другой

«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 како-  
нибудь неба, мы должны здесь  
принять за планеты, а те, которые  
проходят через различные небеса,  
мы должны считать кометами».



«Математические начала натуральной философии»  
Книга 2 «О движении тел»

Отдел VI посвящен вопросу «О движении маятников при сопротивлении».

Особое внимание уделено двум вопросам:

1. Использование маятника в качестве прибора, позволяющего экспериментально определять сопротивление среды движению тела;
2. Изучение соотношения между весом тела и его (инерциальной) массой.

В «Общем поучении», заканчивающем отдел, Ньютон описывает эксперименты с качанием маятника при наличии сопротивления, из которых он вывел, что «масса всякого тела всегда пропорциональна его весу».

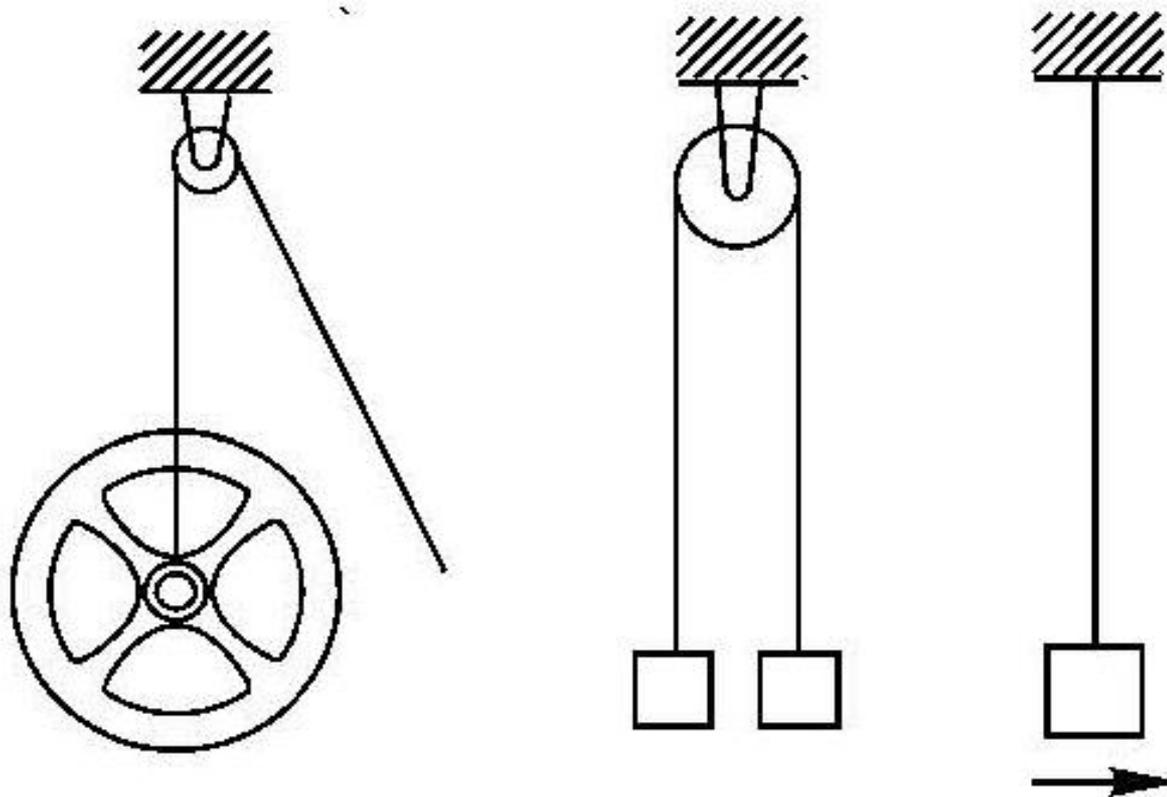
## И. Ньютон. Понятие инерциальной массы.

### Ее отличие от веса (гравитационной массы)

«Множество данных опыта, достаточное количество которых находилось в распоряжении Ньютона, ясно свидетельствует о существовании *определяющего движение признака*, отличного от веса тела».

Э. Мах. «Механика. Историко-критический очерк ее развития» (1883) (с. 166)

Мах имеет в виду (инерциальную) массу тела



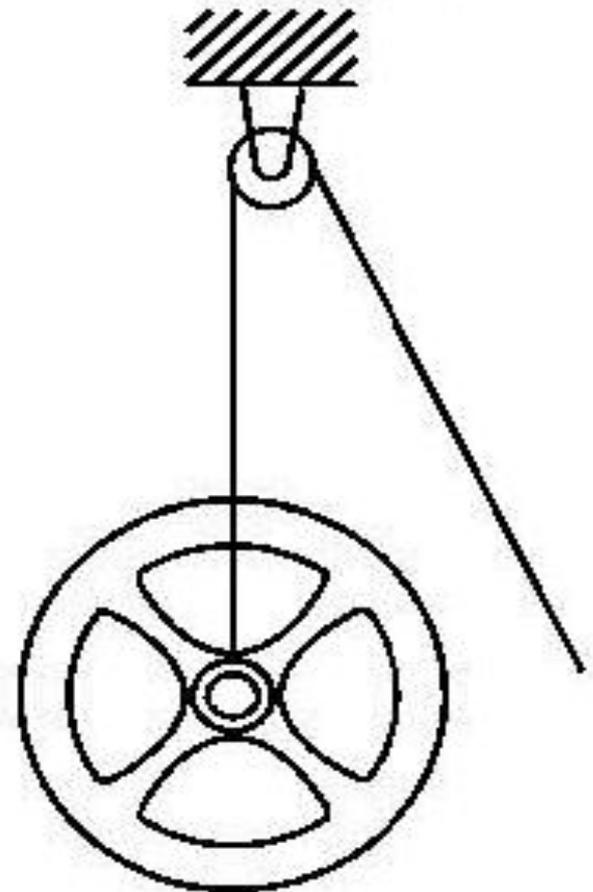
## И. Ньютон. Понятие инерциальной массы. Ее отличие от веса (гравитационной массы)

«Если привязать веревку к массивному колесу, перебросить ее через блок и потянуть колесо вверх, мы почувствуем вес махового колеса.

Но если поместить это колесо на возможно более цилиндрическую и гладкую ось и возможно лучше сбалансировать его, оно не будет уже, благодаря своему весу, занимать определенного положения.

При всем том мы чувствуем огромное сопротивление, как только попытаемся привести колесо в движение или движущееся колесо остановить.

*Перед нами явление, которое дало повод для провозглашения особого свойства инерции или даже силы инерции...».*



## И. Ньютон. Понятие инерциальной массы. Ее отличие от веса (гравитационной массы)

«Большой груз, подвешенный на очень длинной нити в качестве маятника, может быть без труда удержан небольшим отклонением нити рядом с положением равновесия. Составляющая этого веса, которая гонит маятник в положение равновесия, очень мала. Тем не менее, мы чувствуем значительное сопротивление, когда мы быстро (!) двигаем груз или хотим задержать его движение. Груз, который едва носится воздушным шаром, оказывает всякому движению ощутимое сопротивление, несмотря на то, что вес его не должен уже быть преодолеваем.

Если принять еще в соображение, что одно и то же тело на различных географических широтах и в различных местах мирового пространства получает весьма различные ускорения тяжести, мы должны будем признать (инерциальную) массу признаком, определяющим движение и отличным от веса тела».



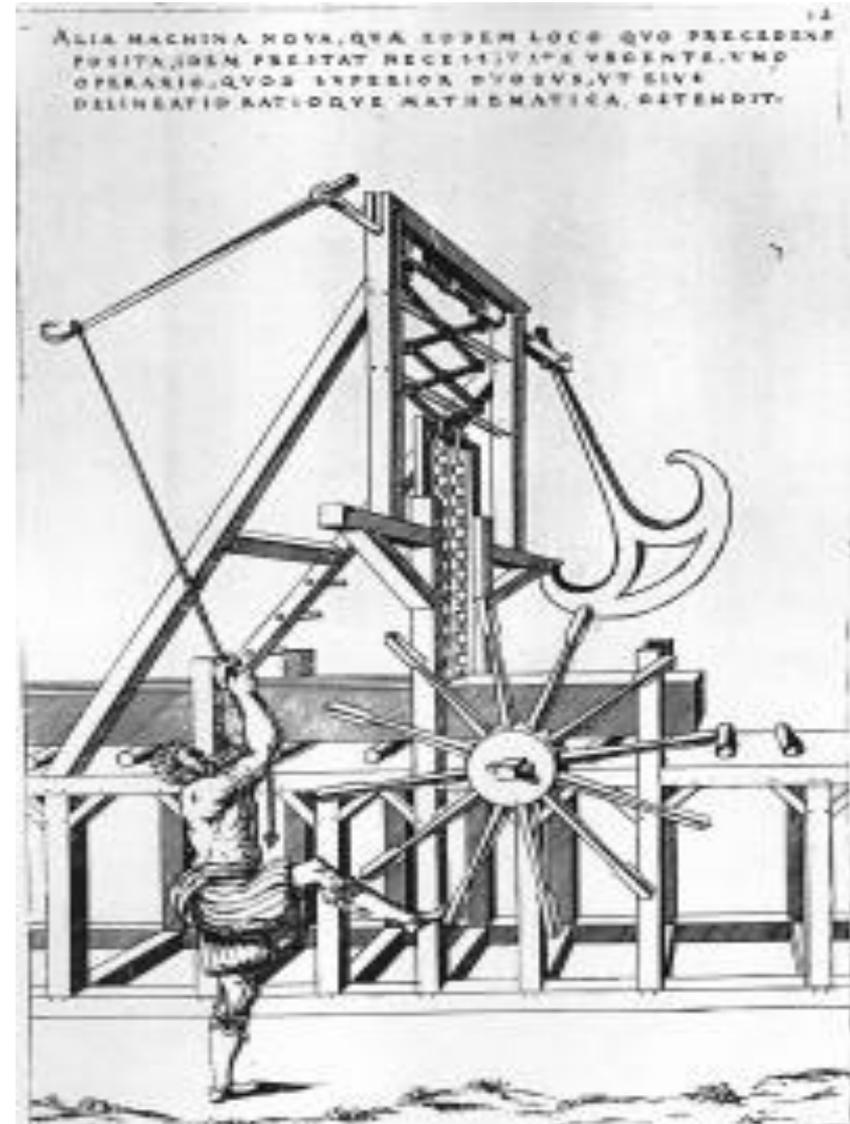
## Jacques Besson, *Theatrum instrumentorum* (1582)

### Тяжелый технологический маятник на пилораме

«Это еще одна новая машина ..., которая позволяет одному рабочему в случае необходимости совершать работу, которую выполняют двое при работе на ранее описанной машине (пилорама без маятника – *Е.З.*); это ясно из конструкции [машины] и математических рассуждений».

Замечание. На деле, такая машина не облегчает труд работника. Это было проверено экспериментально в конце XX в. в ходе работы на установке, сделанной по рисунку Жака Бессона.

С исторической точки зрения важно то, что автор верил, что технологический маятник - также как и маховое колесо – способен создать дополнительную энергию.



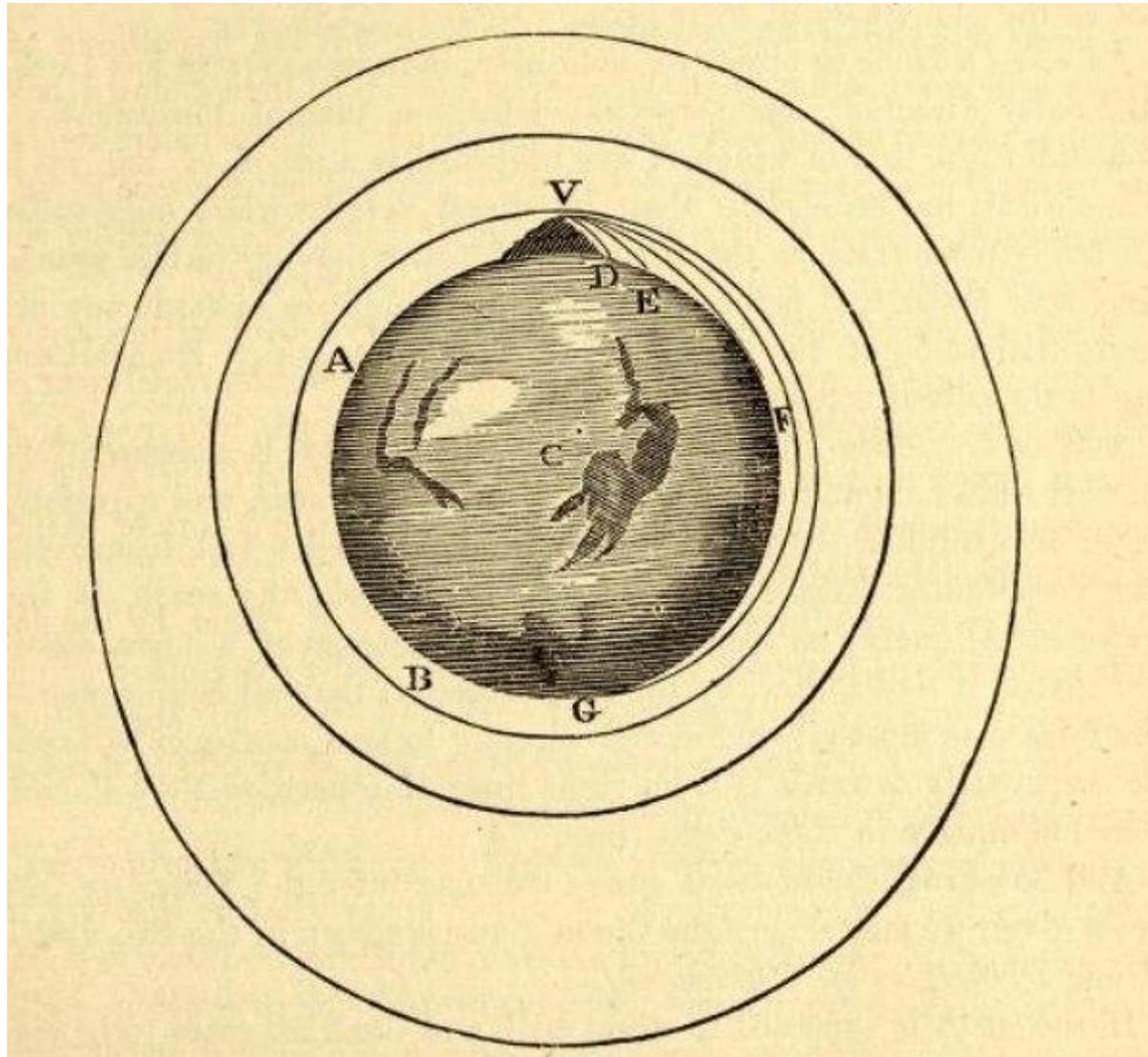
«Математические начала натуральной философии»  
Книга 2 «О движении тел»

Отделы V, VII, VIII посвящены почти исключительно вопросам гидростатики и гидродинамики (механизм сопротивления и влияния формы тел на сопротивление, волновое движение в средах и т.д.)

«Математические начала натуральной философии»

Книга 3

Isaac Newton, *A Treatise of the System of the World*, 2nd ed. (London, 1731).



## Книга 3

Третьей книге предпосланы «Правила философствования» и «Явления», т. е. обобщенные данные астрономических наблюдений.

Явление 1. Относится к спутникам Юпитера, орбиты которых «не отличаются чувствительно» от кругов с центрами в центре этой планеты; к ним применим закон площадей (второй закон Кеплера) и третий закон Кеплера.

Явление 2. То же относительно спутников Сатурна.

Явления 3—5. Утверждается справедливость второго и третьего законов Кеплера относительно пяти «главных планет» (Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна).

Явление 6. Применимость закона площадей к движению Луны.

## Теория Луны

Центральное место в 3 книге занимает предложение 4:

«Луна тяготеет к Земле и силою тяготения постоянно отклоняется от прямолинейного движения и удерживается на своей орбите».

Отсюда Ньютон делает свой знаменитый вывод, что сила, которая удерживает Луну на ее орбите, есть та самая сила, которая называется тяжестью, или тяготением.