

Лекция 12

Создание теории всемирного тяготения

Создание теории всемирного тяготения

- В 1661 г. в Лондоне была образована комиссия для изучения природы тяжести, в которую вошли Р.Бойль, Р.Гук и другие.
- В 1674 г. Гук опубликовал мемуар **«Попытка доказательства годичного движения на основе наблюдений»**, в котором изложены все его соображения о движении планет и Луны.

Роберт Гук (1635-1703)

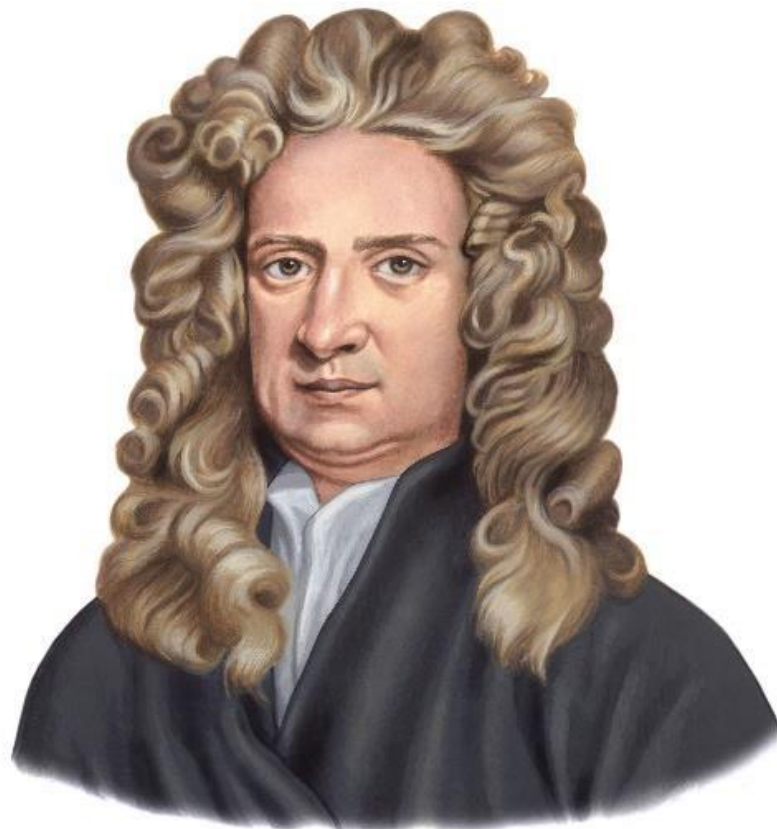


- Роберт Гук (1635-1703) был из семьи священников, имел незаурядные способности инженера, любил мастерить. Закончил Оксфордский университет. Имел феноменальную память. Все книги Евклида он прочёл и усвоил за 1 неделю.
- Гук был замечательным учёным-физиком, на интуитивном уровне создавал картину мира, думал о тяготении и тд.
- Его сделали учёным секретарём **общества.**

Создание теории всемирного тяготения (Р.Гук)

- В 1674 Гук опубликовал мемуар «Попытка доказательства годичного движения на основе наблюдений», в котором изложены все его соображения о движении планет и Луны.
- Итоги рассуждений:
 - 1) не только Солнце притягивает планеты, но и планеты притягивают Солнце и друг друга;
 - 2) 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;
 - 3) притягивающее действие тем больше, чем ближе тело к центру притяжения.

И.Ньютон (1643-1727)

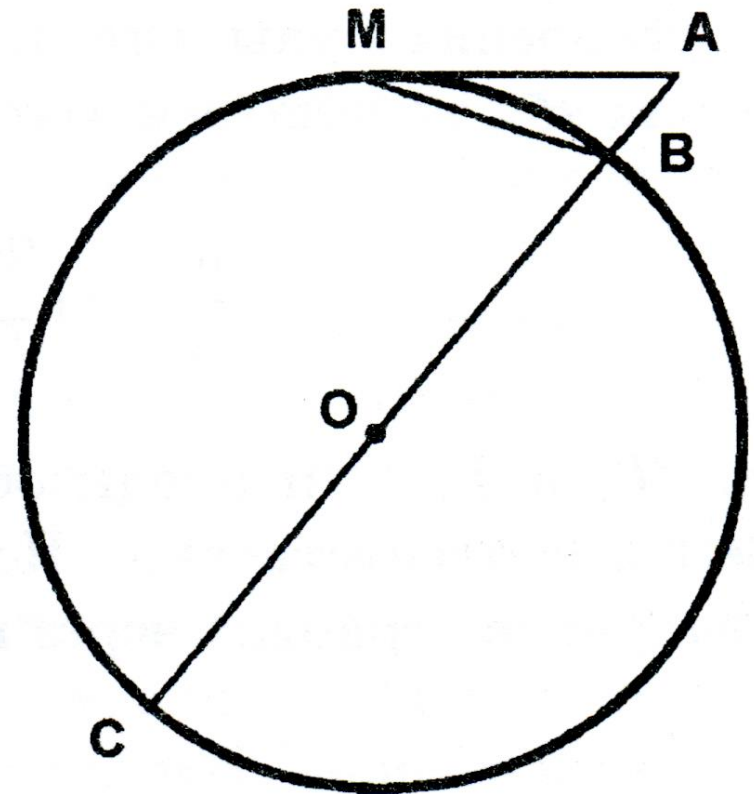


Создание теории всемирного тяготения (И.Ньютон)

- Из-за чумы 1665 г. И.Ньютон жил на своей ферме Вулсторп. Здесь в саду в спокойной обстановке Ньютон впервые провел расчет, в котором фигурировала **сила (или стремление), обратно пропорциональная квадрату расстояний.**

Создание теории всемирного тяготения (И.Ньютон)

- Точечное тело движется равномерно со скоростью v по окружности радиуса R .
- Криволинейное движение обусловлено некоторой материальной связью: либо нитью **$OM=R=const$** , либо невесомым стержнем такой же длины, либо круговым желобком для шарика M .



Создание теории всемирного тяготения (И.Ньютон)

- При нарушении связи за время τ переместился бы по касательной из точки M в точку A : $MA = v \cdot \tau$

$$AB \sim \frac{a\tau^2}{2} \quad MA^2 = AB \cdot AC$$

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

$$a = \frac{v^2}{R}$$

Создание теории всемирного тяготения (И.Ньютон)

- «... сила станет пропорциональной отношению квадрата дуги, описанной в **заданное** время, к радиусу».

Создание теории всемирного тяготения (И.Ньютон)

- На основе третьего закона Кеплера Ньютон смог вывести обратно-квадратичную зависимость силы тяготения от расстояния между взаимодействующими телами.
- Если обозначить через a_l и a_3 ускорения Луны и тела, движущегося вокруг Земли по орбите с радиусом земли R_3 , то отношение ускорений выразится так:

$$\frac{a_l}{a_3} = \frac{\left(\frac{2\pi}{T_l}\right)^2 \cdot R_l}{\left(\frac{2\pi}{T_3}\right)^2 \cdot R_3} = \frac{T_3^2 \cdot R_l}{T_l^2 \cdot R_3}$$

Создание теории всемирного тяготения (И.Ньютон)

- По III закону Кеплера можно заменить отношение квадратов периодов через кубы соответствующих радиусов R_3 и R_l

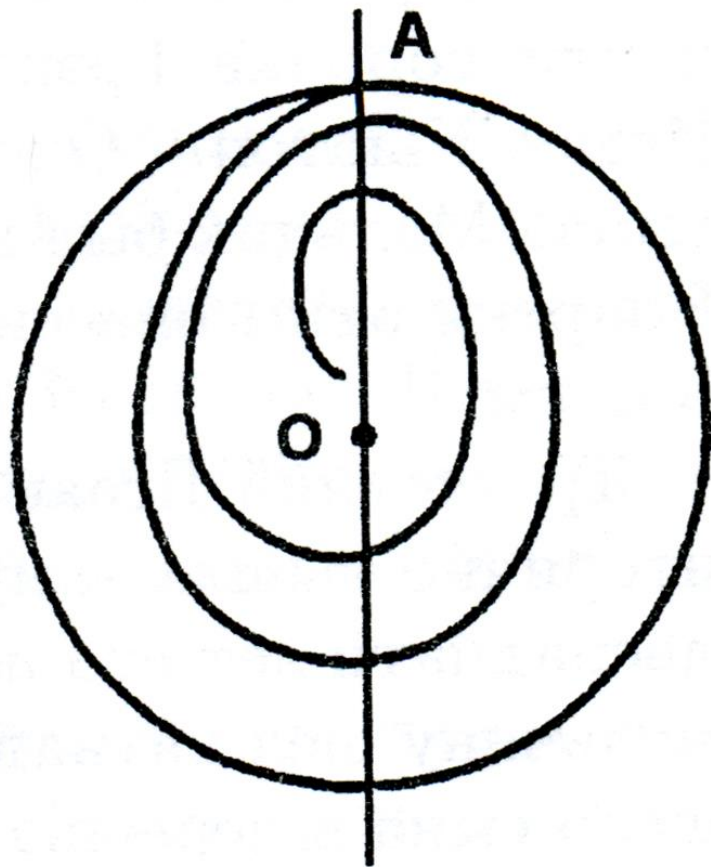
$$a_l / a_3 = (R_3^3 R_l) / (R_l^3 R_3) = R_3^2 / R_l^2$$

Таким образом, Ньютон получил основу будущего закона тяготения.

Создание теории всемирного тяготения

- «Если бы около Земли вращалось бы несколько лун, подобно тому как около Юпитера и Сатурна, то времена их обращений следовали бы планетным законам, открытым Кеплером, и поэтому их центростремительные силы были бы обратно пропорциональны квадратам расстояний. Если бы наинизшая из этих лун была малой и почти что касалась вершин высочайших гор, то центростремительная сила, которою бы она удерживалась на своей орбите, (согласно предыдущему расчету), равнялась бы (приблизительно) силе тяжести на вершине этих гор; если бы этот спутничек лишить его поступательного движения по орбите, то вследствие отсутствия центробежной силы, от которой он продолжает оставаться на своей орбите, он под действием предыдущей стал бы падать на Землю и притом с такою же скоростью, с какою на вершинах этих гор падают тяжелые тела, ибо в обоих случаях действующие силы равны...
- Следовательно, та сила, которою Луна удерживается на своей орбите, есть та же самая, которую мы называем силою тяжести, ибо в противном случае или сказанный спутничек на вершинах гор не имел бы тяжести, или падал бы...»(с.513)

Создание теории всемирного тяготения



Об основах классической механики в трактате И. Ньютона «Математические начала натуральной философии» («Philosophiae naturalis Principia mathematica»)

Прижизненные издания:

I-е - в 1687г., II-е - в 1713г., III-е -- в 1726г.

И. Ньютон (1643-1727)

- Ньютон родился 4 января (25 декабря) 1643 в деревне Вулсторп в окрестности городка Грэнтэм севернее Кембриджа.
- В 1661 принят в Коллегию Троицы в Кембридже.
- 1665 – степень бакалавра. 1665 из- за чумы жил на своей ферме.
- 1665-1667 – размышления под яблоней,
- Учитель – Исаак Барроу (1630-1677).

- 1686 время сдачи книги «Начала» в печать
- 1696 – король назначил Ньютона хранителем монетного двора
- 1699 – главный директор этого двора, член Парижской академии наук
- 1703- президент Лондонского Королевского общества, членом которого он был с 1672 (зеркальный телескоп)
- 1705 королева Анна возводит Ньютона в дворянство
- Умер 21 марта 1727 и похоронен в Вестминстерском аббатстве.

Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

- «В истории естествознания не было события более крупного, чем появление «Начал» Ньютона. Причина была в том, что эта книга подводила итоги всему сделанному за предшествующие тысячелетия в учении о простейших формах движения материи».

(С.И.Вавилов)

Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

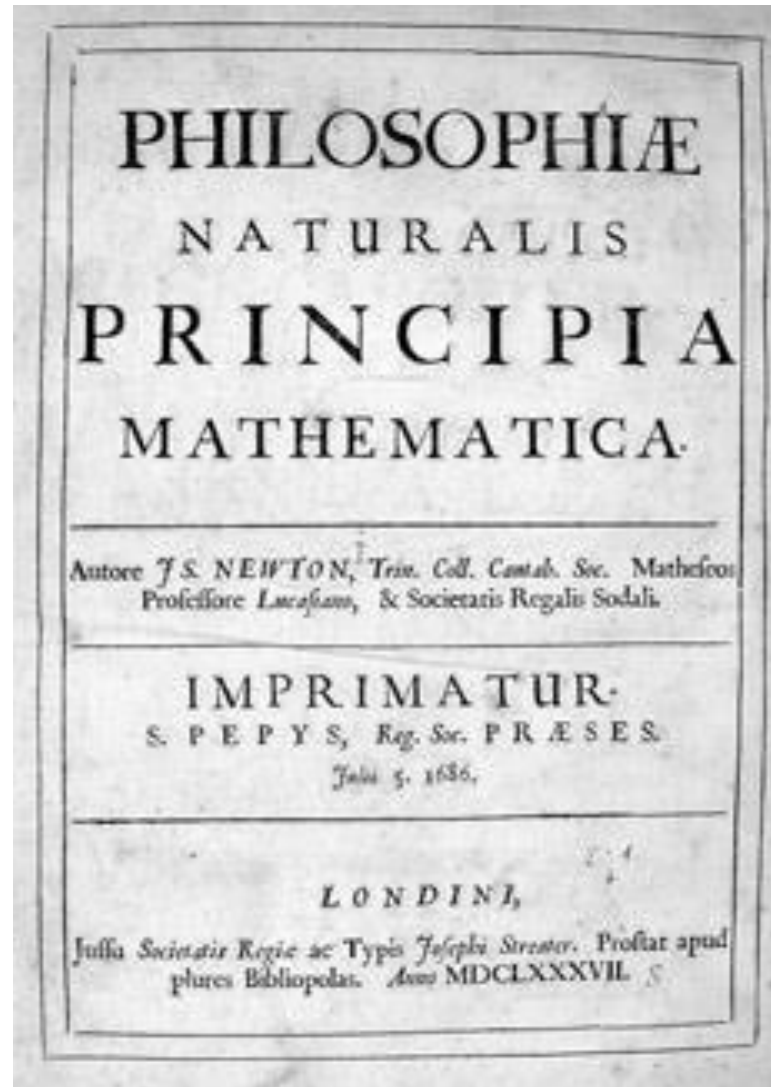
В начале **1685** г. рукопись мемуара «**О движении**», Ньютон передал для регистрации в Королевское общество. Здесь излагались фундаментальные положения динамики.

- В **1686**г. были закончены две первые книги трактата «**Математические начала натуральной философии**» («Philosophiæ naturalis Principia mathematica»).

Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

- Весной 1687 г. уже печаталась III книга «О системе мира»
- (На титульном листе арабскими цифрами 1686 напечатано время сдачи книги в печать (Imprimatur), а дата выхода приведена латинскими цифрами: MDCCLXXXVII, поэтому датой появления «Начал» часто считают **1687г.**)

Трактат И. Ньютона «Математические начала...»



Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

- **Цель трактата:** описать явления природы с помощью математики, дать тщательное развитие приложений математики к физике.
- Сфера практической механики - производство, ремесло.
- Механику вслед за древними Ньютон разделяет на **рациональную, т.е. умозрительную**, развиваемую точными доказательствами, и **практическую**, берущую свое происхождение от ремесел и производства.
- С другой стороны механика граничит с ``геометрией''. «Итак, геометрия основывается на механической практике и есть не что иное, как часть **общей механики**, в которой излагается и доказывается искусство точного измерения»

Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

- Ньютон определяет связь механики, как учения о силах и движениях, с физикой, то есть с учением о всех явлениях природы, трактуемых механически.
- **«Вся трудность физики состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления»**

Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

Из уравнений движения материальной точки логически выводятся **три основные теоремы динамики**, а из теорем (при известных ограничениях) - **три закона**:

закон сохранения движения центра масс изолированной системы,

закон площадей для точки, движущейся под действием центральной силы,

закон сохранения механической энергии в поле консервативных сил.

И.Ньютон «Начала», Книга I

- С помощью нового исчисления (в геометрической архаичной форме) Ньютон решил задачу об эллиптическом *движении* планеты под действием притяжения Солнца *обратноквадратичного расстоянию*.

Такую задачу безуспешно пытались решить коллеги Ньютона – Гук, Галлей и Рен.

(По существу Ньютон впервые решил фундаментальную задачу динамики:

о криволинейном, неравномерном движении материальной точки под действием центральной силы).

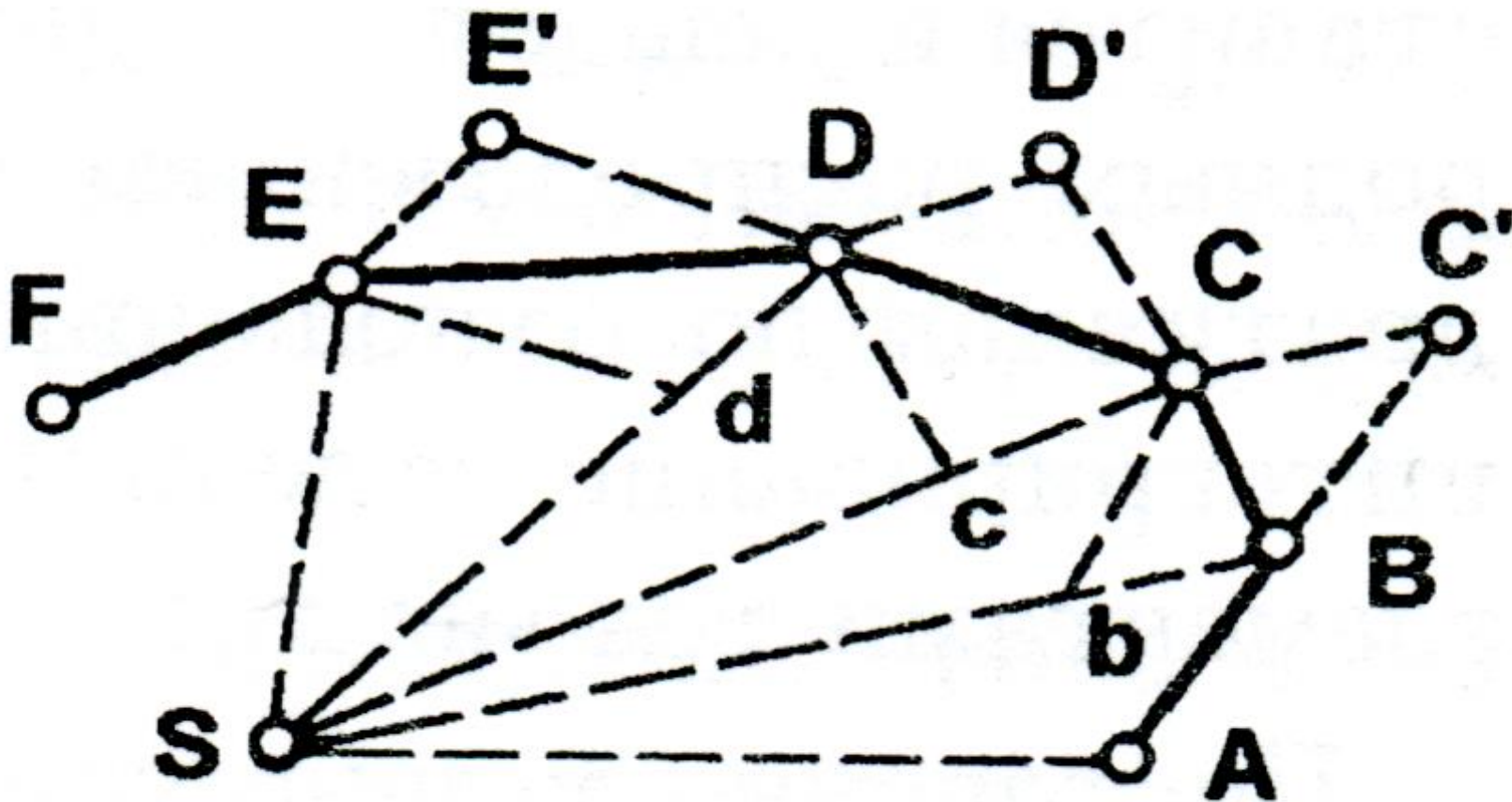
Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

- В **первой** книге трактата, называющейся **«О движении тел»** (в **пустоте**) Ньютон выводит законы Кеплера, исходя из определенных предположений о характере силы.

Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

- **Теорема первая (отдела второго) гласит: площади, описываемые радиусами, проводимыми от обращающегося тела к неподвижному центру сил, лежат в одной плоскости и пропорциональны временам описания их.**
 - закон площадей (второй закон Кеплера), сила центральная

Трактат И. Ньютона «Математические начала...»



Теорема I - Закон площадей (Книга I)

Увеличивая число треугольников и уменьшая их высоту бесконечно, получим, что в пределе периметр $ABCD$ будет кривой линией, расположенной в одной плоскости и удовлетворяющей свойству сохранения площадей, описываемых радиусом за равные промежутки времени.

И.Ньютон «Начала», Книга I

- Рассмотрено много задач о невозмущенном движении небесного тела под действием силы притяжения Солнца, обратно пропорциональной квадрату расстояния до Солнца. Доказывается, что в этом случае траектории будут представлять собой различные *конические сечения*.
- Выводятся предложения, содержащиеся в трех законах Кеплера, исходя из определенных предположений о характере силы.

И.Ньютон «Начала», Книга I

Далее Ньютон затрагивает вопросы возмущенного движения планет, под действием возмущающих сил притяжения со стороны какой-либо соседней планеты, при наличии главного фактора – притяжения Солнца.

В *Отделе XI* находим постановку задачи *трех и более взаимодействующих тел* (фактически материальных точек).

И.Ньютон «Начала», Книга I

- В XII и XIII отделах Ньютон занимается разработкой основ теории притяжения сферических тел (а затем и тел произвольной формы). Сначала ставится и решается задача о притяжении точки сферическим телом, с однородным распределением плотности.
- Сила притяжения всюду обратно квадратичная по отношению к расстоянию. Фактически Ньютон выполняет интегрирование отдельных сил притяжения между мысленно выделенными элементами тел (исчезающе малых размеров) с материальной точкой.

И.Ньютон «Начала», Книга I

Рассматривается притяжение двух однородных сфер, которое сводится к обратно квадратичному притяжению их центров, как будто массы сфер сосредоточены в этих центрах.

Рассматриваются вопросы взаимодействия светонесущих частиц с линзами, призмами и пр. (Так делается переход к оптическим задачам - о распространении, преломлении световых лучей, трактуемым чисто механически).

- Из задач технического характера решаются задачи о колебании маятников в среде без сопротивления (по окружности, циклоиде и сфере).

И.Ньютон «Начала», Книга II

- Книга II “О движении тел”
- отличие -- в характере задач, так как движение рассматривается в среде, оказывающей сопротивление.
- Поэтому большая часть книги посвящена вопросам гидромеханики.
- Однако главная цель, которую ставит перед собой Ньютон в этой книге, состоит в опровержении вихревой гипотезы Декарта.

И.Ньютон «Начала», Книга II

- Ньютон доказал, что если бы космическое пространство было заполнено некоторой материальной средой, то она оказывала бы сопротивление движению тел, тогда (*точный расчет это доказывал*) траектории планет не были бы замкнутыми. Но планеты в задаче двух тел движутся по эллипсам, что подтверждено наблюдениями и правильностью законов Кеплера.
- Следовательно, рассуждал Ньютон, мировое пространство пусто, гипотеза вихрей неверна.

И.Ньютон «Начала», Книга II (2-е издание)

- Во второе издание “Начал” вошел теоретически обобщенный Ньютоном эмпирический материал **Дезагюлье** и **Гоуксби**, проводивших опыты по бросанию шаров с башни собора Св. Павла в Лондоне. Шары различных размеров (стеклянные, заполненные различными веществами).
- Описываются также собственные опыты Ньютона с падением шаров из различного материала в воде.

И.Ньютон «Начала», Книга II (2-е издание)

- **Ньютон вводит поочередно гипотезы о зависимости сопротивления воздуха от скорости движения в нем тела в виде линейного, квадратичного и двучленного закона.**
- Эти задачи имеют большое значение в баллистике.
- Несколько позже Д.Бернулли, Эйлер и другие довели эту теорию до приложения в артиллерийской практике (составление таблиц стрельб с учетом сопротивления воздуха).

И.Ньютон «Начала», Книга II (2-е издание)

- В *четвертом отделе* исследуется круговое движение тела в сопротивляющейся среде.
- В *пятом отделе*, посвященном гидростатике, выводится ряд **свойств несжимаемой жидкости**.
- Затем исследуются свойства **сжимаемой жидкости, плотность которой пропорциональна давлению** (закон Бойля - Мариотта).
Здесь, в частности, выведена барометрическая формула.

И.Ньютон «Начала», Книга II (2-е издание)

- В *шестом отделе* Ньютон исследует качания маятников в сопротивляющейся среде. С одной стороны, Ньютон указал возможность определять с помощью колебаний характеристики сопротивления среды. Но второй более принципиальной стороной этой проблемы был вопрос об установлении факта **пропорциональности веса и массы.**

И.Ньютон «Начала», Книга II (2-е издание)

- Ньютон описывает свои опыты с качаниями маятников, в виде **кадочек**, заполненных различными веществами: деревом, золотом, свинцом, зерном, водой.
- Ньютон пришел к выводу, что **вес тел пропорционален их инерции, то есть массе независимо от формы и химического состава тел.**
- Этот важнейший физический факт в учении о тяготении позже неоднократно проверяли,
- в 1828г. **Ф.Бессель** с большой точностью, а затем **Л.Этвеш** (в конце XIXв.) с точностью до 10^{-8} , (у Ньютона была 10^{-3}).

И.Ньютон «Начала», Книга II (2-е издание)

- В *седьмом* отделе изучается механизм сопротивления и влияния формы тел на сопротивление, которое оказывает жидкость на движение тел.
- *Восьмой* отдел посвящен изучению волнового движения в средах: в частности звуковым волнам в воздухе. Ньютон выводит формулу для скорости звука в воздухе:
«Скорости распространяющихся в упругих жидкостях сотрясений находятся в прямом отношении корней квадратных сил упругости жидкости и в обратном отношении корней квадратных их плотностей, причем предполагается, что сила упругости жидкости пропорциональна сгущению ее»

И.Ньютон «Начала», Книга II (2-е издание)

- Последнее предположение о пропорциональности давления (силы упругости) плотности жидкости есть формулировка закона Бойля-Мариотта для сжимаемой жидкости.
- Эта формула для скорости звука давала расхождение с данными опытов, чего не мог объяснить Ньютон.
- Позже Лаплас объяснил это расхождение тем, что процесс распространения звуковой волны не является изотермическим и закон Бойля-Мариотта является упрощением.

И.Ньютон «Начала», Книга II (2-е издание)

- В *девятом* отделе встречаем классическую формулу пропорциональности сопротивления трения (касательного) вязкой жидкости производной скорости по нормали к направлению потока.
- Эта формула, ставшая основой механики вязкой жидкости, высказана тоже словесно:
«Сопротивление, происходящее от недостатка скользкости жидкости, при прочих одинаковых условиях предполагается пропорциональным скорости, с которой частицы жидкости разъединяются друг от друга»
- (Скорости разъединения слоев стали трактовать как производную скорости по нормали к направлению движения).

И.Ньютон «Начала», Книга II (2-е издание)

Общий вывод Ньютона о том, что вихревые движения жидкости не удовлетворяют третьему закону Кеплера (для элементов жидкости), правилен.

Вихревую гипотезу Декарта Ньютон считал опровергнутой.

**И. Ньютон «Математические начала
натуральной философии»**

**третья книга – «О системе
мира»**

И. Ньютон «Математические начала...»

- **«Правило I.** Не должно принимать в природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений».
- **«Правило II.** Поэтому, поскольку возможно, должно приписывать те же причины того же рода проявлениям природы».

И. Ньютон «Математические начала...»

- **«Правило III. Такие свойства тел, которые не могут быть ни усилиемы, ни ослабляемы, и которые оказываются присущими всем телам, над которыми возможно производить испытания, должны быть почитаемы за свойства всех тел вообще».**

И. Ньютон «Математические начала...»

- **«Правило IV. В опытной физике предложения, выведенные из совершающихся явлений помощью наведения, несмотря на возможность противных им предложений, должны быть почитаемы за верные или в точности, или приближенно, пока не обнаружатся такие явления, которыми они еще более уточнятся или же окажутся подверженными исключениям»**

И. Ньютон «Математические начала...»

- **Программа индуктивного способа познания истины о законах природы: от явления (опытов) к обобщениям, к теории.**

И. Ньютон «Математические начала...»

- Исходя из **явлений** Ньютон выводит **закон всемирного тяготения**, устанавливая, что сила взаимодействия между Солнцем и планетой, планетой и спутником прямо пропорциональна массе каждого тела и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

И. Ньютон «Математические начала...»

- **Опыты с маятниками одинаковой длины, грузики которых были из различных материалов. Колебания таких маятников с точностью до одной тысячной оказались изохронными. Это доказывало, что ускорение силы тяжести (проявления силы тяготения на Земле) не зависит от веса, формы и материала колеблющегося грузика (т.е. пропорциональность веса количеству материи)**

И. Ньютон «Математические начала...»

- ``Сила тяжести иного рода, нежели сила магнитная, ибо магнитное притяжение не пропорционально притягиваемой массе. Магнитная сила в том же самом теле может быть увеличиваема и уменьшаема. При удалении от магнита она убывает не обратно пропорционально квадратам расстояний, а ближе к кубам, поскольку я смог судить по некоторым грубым опытам".

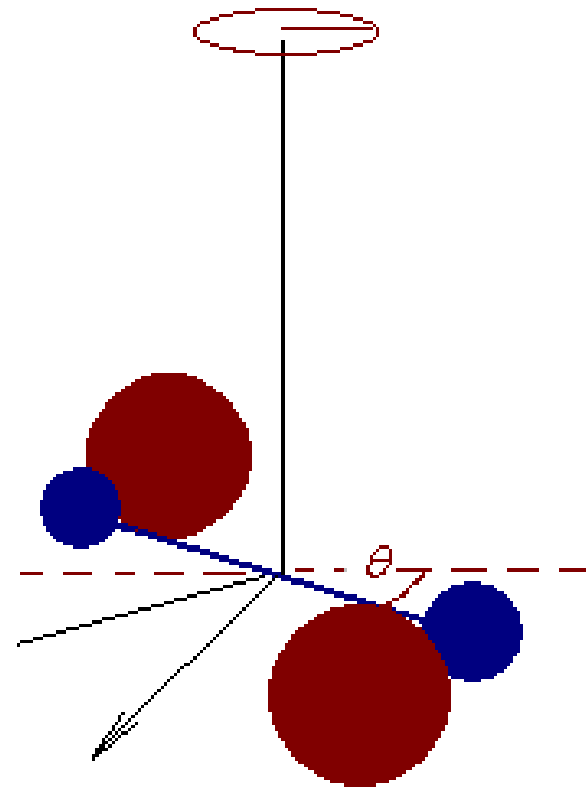
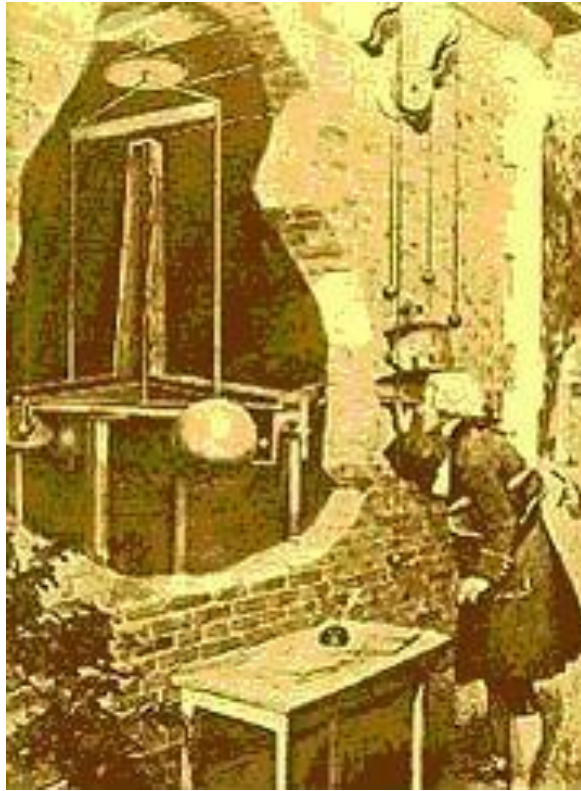
И. Ньютон «Математические начала...»

- В 1798 г. Г.Кавендиш показал, как можно с помощью крутильных весов измерять тяготение между земными телами



Рис. 1. Генри Кавендиш (1731-1810 гг.) - выдающийся английский ученый в области экспериментальной физики и химии.

И. Ньютон «Математические начала...»



И. Ньютон «Математические начала...»

- **Оставалось еще одно сомнение в системе воззрений Ньютона: в чем состоит механизм тяготения?**
- **«...Тяготение должно вызываться агентом, постоянно действующим по определенным законам. Является ли, однако, этот агент материальным или нематериальным, решать это я предоставил моим читателям»**

И. Ньютон «Математические начала...»

- Из закона всемирного тяготения строится теория движения планет, их спутников, комет по их эллиптическим и параболическим траекториям.**
- Особенности движения Луны (ее неравенства) объяснимы возмущающими действиями Солнца, являющимися дополнением к основному притягивающему действию Земли**

И. Ньютон «Математические начала...»

- Приливы и отливы имеют причиной действия притяжения Солнца и Луны на воды океана
- О фигуре Земли: предположение о первоначально жидкой вращающейся массе позволило Ньютону установить связь между ее сжатием и центробежным эффектом силы тяжести на экваторе.

Ньютонианцы и картезианцы

- Центральными моментами этих дискуссий являлись вопросы о природе света и о природе тяготения.
- Картезианскую и бэконовско-ньютонианскую точку зрения объединяют общие интересы в борьбе со схоластикой Аристотеля.
- Их объединяет присущий им обоим механицизм.

Ньютонианцы и картезианцы

- Разногласия возникают в вопросе о методе и в натурфилософских концепциях.
- Метод **Декарта**: научная интуиция и тесно связанная с ней научная гипотеза играют первостепенную роль.
- **Ньютонианцы**: «не измышлять гипотез»

Ньютонианцы и картезианцы

- По основным физическим воззрениям разногласия сводятся:
- Допущение или недопущение пустоты
- Отношение к категории силы.

Ньютонианцы и картезианцы

- У **Декарта** нет места имматериальности; весь мир материален, отсюда логически вытекает и отсутствие пустоты и изгнание категории силы, как некоего надматериального агента, одушевляющего материю.
- Движение может порождаться только движением.

Ньютонианцы и картезианцы

- У **Ньютонианцев** в природе имеет место дуализм материи и пустоты. Материальные частицы являются силовыми центрами, благодаря чему они взаимодействуют друг с другом.
- Раскрывать природу тяготения не следует, достаточно дать формальное описание дальнего действующего притяжения.

И.НЬЮТОН

- **НЬЮТОН:** «превращение тел в свет и света в тела соответствует ходу природы, которая как бы усложняется превращениями» («Оптика»)
- Вес тела пропорционален его массе.
(Опыт с кадочками)
- Вес не может зависеть и от формы тел.
- Инертная масса и масса гравитационная друг другу пропорциональны!

Главное значение трактата «Начала»:

- **Была дана тщательная сводка формулировок основных понятий и основных законов механики, завершающая труды предшественников Ньютона в области той части динамики, которая связана с развитием познания закона ускоряющих сил.**

Главное значение трактата «Начала»:

- **В «Началах» была дана сводка конкретных приложений понятий и законов ньютонова варианта механики к решению многих конкретных задач из области механического естествознания XVIIв.**

Главное значение трактата «Начала»:

- **Теория движения во всех рассматриваемых Ньютоном конкретных задачах является теорией количественной и доведенной до возможности конкретного расчета этих движений и количественной проверки теории экспериментом и наблюдением.**