

Лекция 15

Чиненова Вера Николаевна

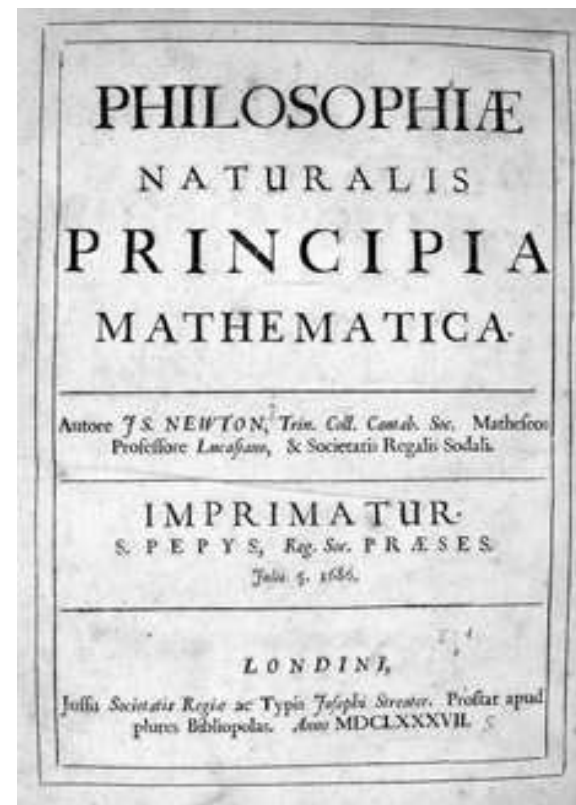
v.chinenova@yandex.ru

**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)



Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

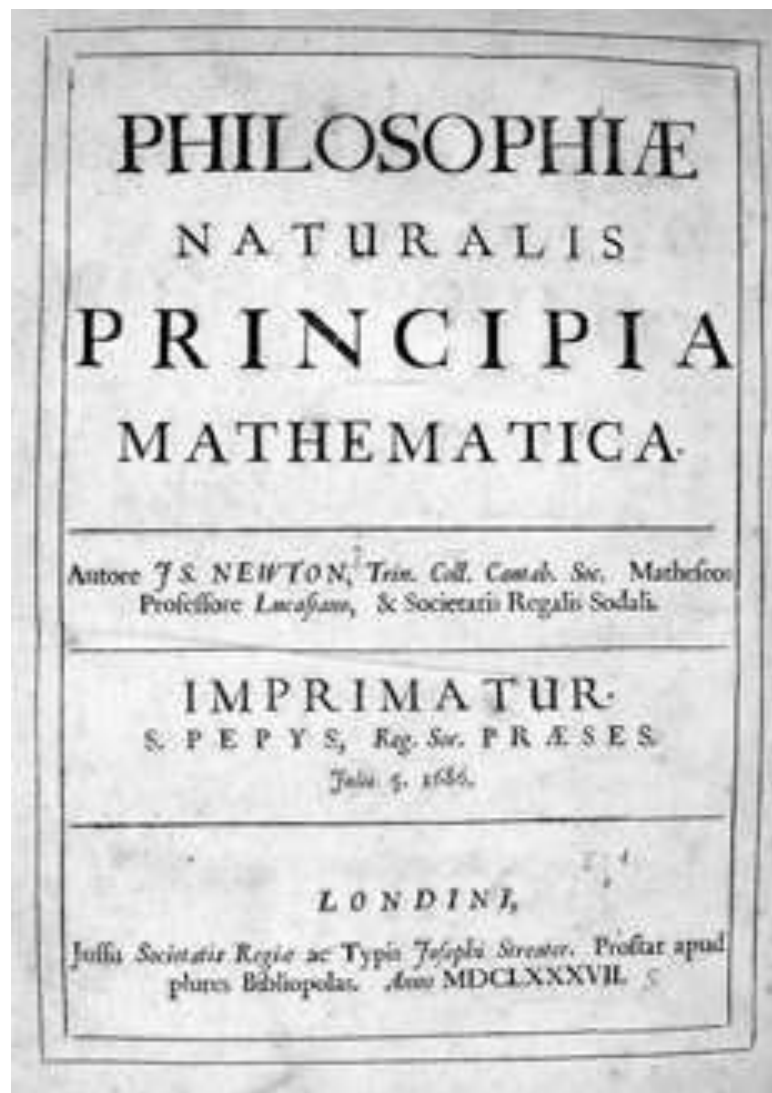
- «В истории естествознания не было события более крупного, чем появление «Начал» Ньютона. Причина была в том, что эта книга подводила итоги всему сделанному за предшествующие тысячелетия в учении о простейших формах движения материи».

(С.И.Вавилов)

Трактат И. Ньютона «Математические начала...»

- 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...»



- **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.

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.

- Книга II, хотя и имеет тот же заголовок, что и Книга I — «О движении тел», отнюдь не является ее продолжением. Это совершенно отдельное сочинение, посвященное механике жидкости и газа, во времена Ньютона почти совершенно не изученной и не имевшей того теоретического фундамента, какой в механике точки составляли работы Кеплера, Галилея, Гюйгенса и других ученых.

Эта Книга, пишет К. Трусделл, один из крупнейших современных специалистов по механике и ее истории, «является полностью оригинальной и во многом ошибочной.

- Дедуктивный метод, который столь замечательно представлен в Книге I, здесь отброшен, и с каждым новым рассуждением выдвигаются новые гипотезы. Здесь Ньютон проявляется во всем величии своего гения. Хотя его решения не всегда правильны, все же он — первый, кто выдвинул эти проблемы и энергично принялся за их разрешение».
- Как и во многих других своих работах по истории науки, Трусделл в этом высказывании чересчур категоричен. Книга II оказывается отнюдь не столь «ошибочной»: в ней сформулирована теория подобия, рассмотрено распространение волн, причем Ньютон дает метод определения длины волны, устанавливает соотношения между длиной волны, ее скоростью и частотой колебаний; получен закон сопротивления для тела, движущегося в жидкости (сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости тела).

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.

- Последние несколько страниц Книги II составляет раздел «О круговом движении жидкостей». Возможно, что именно из-за этого раздела Ньютон поместил Книгу II в «Начала».
- В нем подвергается анализу представление Декарта, что все небесные тела движутся, увлекаемые вихрями тонкой материи, и доказывається, что такое представление не соответствует действительности. Последняя Теорема XLI, которую Ньютон доказывает в этом разделе, гласит: **«Тела, которые при переносе вихрем описывают постоянно одну и ту же орбиту, должны обладать одинаковой с вихрем плотностью и двигаться по тому же закону, что касается скорости и ее направления, как и части самого вихря».**
- Следовательно, говорит Ньютон, **«планеты не могут быть переносимы материальными вихрями... и гипотеза вихрей совершенно противоречит астрономическим наблюдениям и приводит не столько к объяснению движения небесных тел, сколько к их запутыванию».**

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»**

- Ньютон не зря назвал Книгу III «**О системе мира**». Действительно, он свел в единую систему законы природы и способы математических вычислений и показал в заключительной части своего труда, что большинство движений, с которыми мы сталкиваемся во Вселенной — от приливов до перемещений небесных тел, определяются одной-единственной силой, которую он назвал тяготением. Простота исходных предпосылок и неожиданное разнообразие следствий (как простых, так и отнюдь не тривиальных) — вот в чем сила ньютонова метода.

- «Правила философствования («Regulae philosophandi» — правильнее перевести как «Правила рассуждений в науке»), открывающие Книгу III, отсутствовали в первом издании.
- Они представляют собой методологические принципы, которым должен следовать ученый в своих исследованиях: это видоизменение «бритвы Оккама», соединенное с принципом простоты и представлением о том, что все в Природе построено по аналогии.

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».

- «**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.

- Затем в Книге перечисляются так называемые «Явления», т. е. экспериментальные факты, которые должны получить теоретическое объяснение:
- **Явление I.** Спутники Юпитера подчиняются третьему закону Кеплера.
- **Явление II** утверждает то же самое для спутников Сатурна.
- **Явление III.** Пять планет (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн) обращаются вокруг Солнца.
- **Явление IV.** Пять планет движутся в соответствии с третьим законом Кеплера.
- **Явление V.** Второй закон Кеплера выполняется, если за центр притяжения выбрать Солнце, а не Землю.
- **Явление VI.** Второй закон Кеплера справедлив для Луны.

- В последующих шести теоремах доказывается справедливость утверждений, содержащихся в «Явлениях», на основе результатов Книги I.
- В «Поучении», относящемся к тому же разделу, Ньютон подчеркивает, что причина центростремительной силы, посредством которой небесные тела удерживаются на своих орбитах, есть тяготение, а в Теореме VII формулирует закон всемирного тяготения: **«Тяготение существует ко всем телам вообще и пропорционально массе каждого из них»**, добавляя, что сила тяготения по доказанному ранее обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами. Поскольку все небесные тела тяготеют друг к другу, законы Кеплера являются приближенными. Затем рассматриваются различные характеристики Солнечной системы и, наконец, количественная теория Луны и теория комет.

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».**

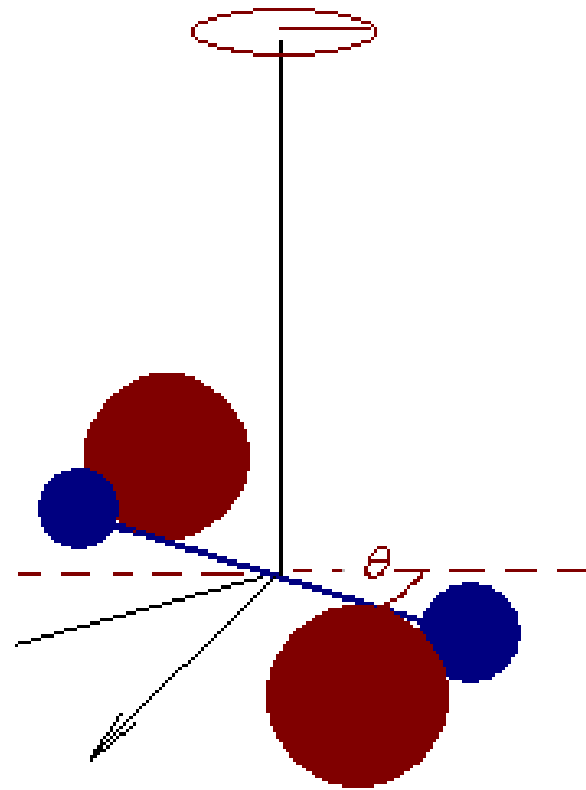
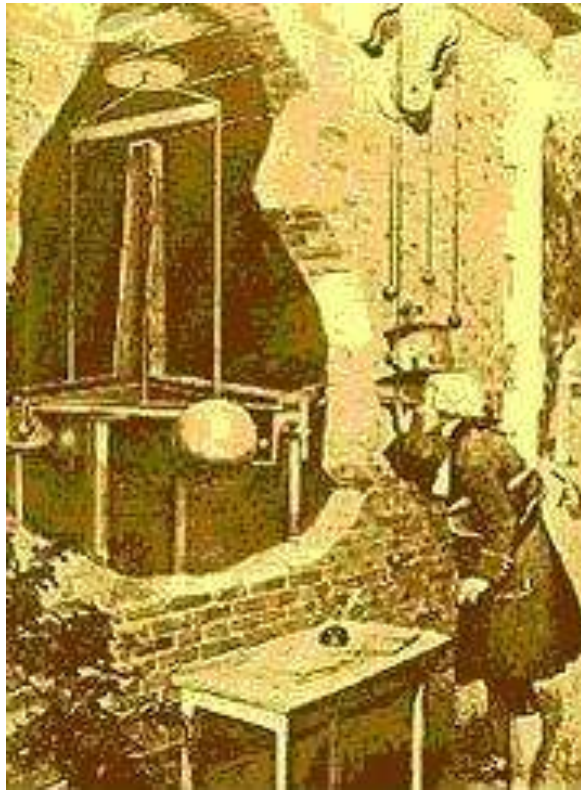
И. Ньютон «Математические начала...»

- 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.**

- Заканчиваются «Начала» «Общим поучением» (отсутствовавшим в первом издании); оно подчеркивает антикартезианскую направленность книги. «Гипотеза вихрей подавляется многими трудностями. Чтобы планета могла описывать радиусом, проведенным к Солнцу, площади, пропорциональные времени, надо, чтобы времена обращений частей вихря были пропорциональны квадратам их расстояний от Солнца. Чтобы времена обращений планет находились в полукубическом отношении их расстояний до Солнца, и времена обращений частей вихря должны находиться в полукубическом же отношении их расстояний до Солнца. Чтобы меньшие вихри вокруг Сатурна, Юпитера и других планет могли сохранять свое обращение и спокойно плавать в вихре Солнца, времена обращения частей солнечного вихря должны быть равны между собой.

- Вращение Солнца и планет вокруг своих осей, которое должно бы согласоваться с движением вихрей, совершенно не согласуется с этими пропорциями. Движения комет вполне правильны и следуют тем же законам, как и движения планет, и не могут быть объяснены вихрями. Кометы переносятся по весьма эксцентрическим орбитам во всех областях неба, чего быть не может, если только вихрей не уничтожить».
- Из всего «Общего поучения» широкую известность получила лишь фраза «гипотезам не место в экспериментальной философии», однако подчеркнем, что большая часть «Почения» посвящена теологическим рассуждениям о месте и действиях Бога во Вселенной, а заканчивается этот раздел гипотезой о существовании эфира, который является причиной самых разнообразных явлений природы.

- Когда Ньютон закончил «Начала», ему было всего 44 года, он находился в середине своего жизненного пути, но вне всякого сомнения — это была вершина. Поразительно, как быстро он получил все внешние свидетельства высокой оценки своего гениального труда. Одна за другой на него посыпались почести и награды: 1699 г. — член Парижской академии наук, 1700 г. — член совета Королевского общества, 1701 г.— член парламента (во второй раз!), 1703 г.—президент Королевского общества и, наконец, в 1705 г. королева Анна возводит его в рыцарское достоинство.

- Ньютон принимал награды и должности и стал по-настоящему независимым человеком. Когда умер Ньютон, на его памятнике в Вестминстерском аббатстве — усыпальнице великих людей Англии — были начертаны слова: «Пусть возрадуются смертные, что среди них жило такое украшение рода человеческого».
- В глазах своих современников он совершил чудо: он понял язык Природы, более того, он вступил с ней в диалог и на свои вопросы о том, как устроен мир, получил четкие и однозначные ответы. Недаром Александр Поп сочинил ему эпитафию:

Nature and nature's laws lay hid in night.

God said: «Let Newton be!» And all was light.

(К Познанию мира ключ лежал во мраке много лет.

«Да будет Ньютон!» — Бог сказал. И вспыхнул яркий свет.)

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 картензианцы

- 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 дальногодействующего 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.**