



Поля и взаимодействия

Лекция 01

Введение.

Откуда у Природы есть Силы?

Лектор: доцент,
ОЛЬЧАК Андрей Станиславович



Механика (II закон Ньютона) **объясняет**, как движутся объекты под действием сил: $m(dv/dt) = F$

Механика **НЕ объясняет**: Какова природа этих сил?
Как они действуют?

Все разного рода силы, с которыми мы имели дело в механике, можно разделить на 2 категории:

1. **Контактные силы**, природа действия которых **кажется** понятной: привели тела в контакт и они действуют друг на друга. Это:

- Силы упругости (пружина действует на прикрепленный к ней груз)
- Сила Архимеда (газ или жидкость действуют на погруженное тело)
- Трение и сопротивление среды
- Реакция опоры и вес,

∴

2. БЕЗ-контактные силы, действующие на расстоянии. Это гравитация, электрические и магнитные силы. Их природа кажется менее понятной.



2. БЕЗ-контактные силы: гравитация, электрические и магнитные силы.

Загадка: как Земля «видит», где Солнце, к которому надо «притягиваться»? Как электрические заряды «чувствуют» присутствие друг-друга на удалении?

С точки зрения здравого смысла **необходим** «посредник», который поможет удаленным телам почувствовать присутствие друг-друга. Таким посредником может быть, например, **среда** в которую погружены оба взаимодействующих тела (*жидкость, газ, «эфир»*). А если среды никакой нет? Если между телами пустое пространство, как между планетами и звездами?

ВЕРСИЯ: тела, обладающие способностью взаимодействовать, испускают некую особую материю – «**силовое поле**», заполняющее все (пустое) пространство вокруг тела. Другие тела «чувствуют» именно это силовое поле.

ЗАДАЧА:: попробовать понять, как могут быть устроены такие силовые поля, сколько их разных типов может существовать в природе, причем понять, опираясь только на логику и самые общие представления об устройстве мироздания.



Силовые поля и заряды.



ЗАДАЧА: понять, как могут быть устроены такие силовые поля, сколько их разных типов может существовать в природе, причем понять, опираясь только на логику и самые общие представления об устройстве мироздания.

Можно предложить, например, такую **Модель взаимодействия на расстоянии:**

- Тело #1, способное действовать на другие определенного рода силой, порождает и заполняет пространство вокруг себя некой особой материей, которую мы будем называть «**силовое поле**».
- Тело #2, обладающее способностью «чувствовать» это силовое поле, ощущает его именно как силу, действующую в определенном направлении.
- По 3-му Закону Ньютона, если тело #1 действует на тело #2 с силой F , то и тело #2 будет действовать на тело #1 с такой-же по величине, но противоположно направленной силой $-F$. Это означает, что тело #2 тоже порождает силовое поле, а тело #1 его тоже «чувствует»
- Логическое следствие: способность «порождать» силовое поле и способность его «чувствовать» должны быть обе присущи обоим взаимодействующим телам!
- Можно сказать так: взаимодействующие тела оба обладают неким «**силовым зарядом**», дающим им как способность «порождать» **силовое поле**, так и «чувствовать» поле, порожденное другим зарядом.



Силовые поля и заряды.



«**Силовой заряд**», или просто **Заряд**: мера способности тела порождать и чувствовать силовое поле определенного рода. Заряд, обычно обозначаемый Q или q – величина, измеряемая количественно. Чем больше заряды взаимодействующих тел, тем больше сила их взаимодействия

Каждому роду без-контактных сил взаимодействия соответствует свой род заряда и свое силовое поле.

Силы гравитации -> гравитационное поле -> гравитационный заряд

Электрические силы -> электрическое поле -> электрический заряд,

... пока это все, что мы знаем из школьного курса, но физика им не исчерпывается.....

ЗАДАЧА:: не обращаясь к экспериментальным данным попробовать понять, как могут быть устроены силы, действующие через посредство силовых полей, опираясь на здравый смысл, логику и общие представления об устройстве мироздания. Когда получим какой-то результат – сравним его с наблюдаемыми фактами и решим, можно ли использовать модель силовых полей на практике, или надо искать иные подходы....



Силовые поля и заряды.



Заряд,: обычно обозначаемый Q или q - мера способности тела порождать и чувствовать силовое поле определенного рода. Чем больше заряды взаимодействующих тел, тем больше сила их взаимодействия .

ЗАДАЧА:: не обращаясь к опытным данным попробовать понять, как могут быть устроены силы, действующие через посредство силовых полей, опираясь только на здравый смысл, логику и общие представления об устройстве мироздания.

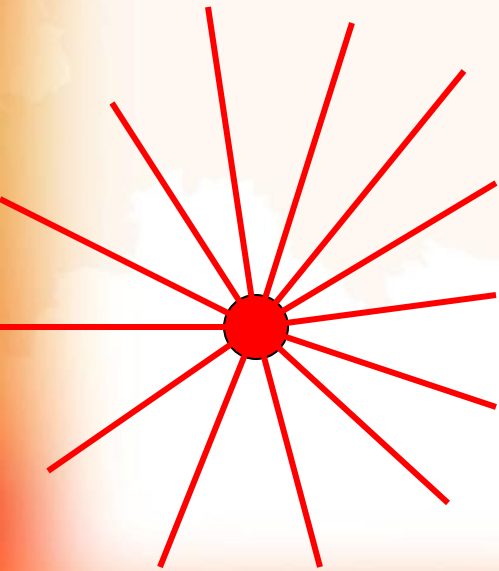
1. Рассмотрим взаимодействие $2=x$ заряженных **материальных точек**. Сила их взаимодействия, очевидно, может зависеть только от величины зарядов Q_1 , Q_2 и расстояния между ними r : $F = F(Q_1, Q_2, r)$. Других параметров просто нет...

2. Заряды Q_1 и Q_2 логически обязаны участвовать в выражении для силы симметрично. Например, так: $F = Q_1 Q_2 f(r) = E_1 Q_2 = Q_1 E_2$

$E_{1,2} = Q_{1,2} f(r)$. – можно рассматривать как **интенсивности силовых полей**, порождаемых 1-м и 2-м зарядами. $f(r)$ – некая убывающая (скорее всего) функция, определяющая зависимость интенсивности поля и силы взаимодействия от расстояния до заряда – источника поля.



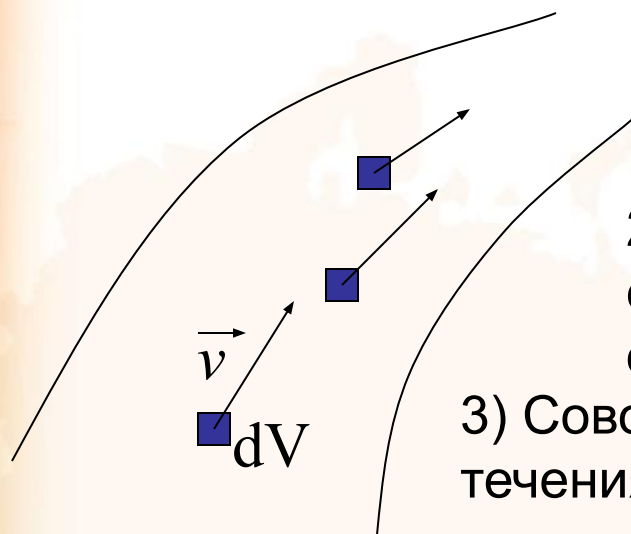
Силу взаимодействия между зарядами логично и естественно представить в виде : $F = Q_1 Q_2 f(r) = E_1 Q_2 = Q_1 E_2$, где $E_{1,2} = Q_{1,2} f(r)$ – интенсивности силовых полей, порождаемых 1-м и 2-м зарядами. $f(r)$ – функция, определяющая зависимость интенсивности поля и силы взаимодействия от расстояния до заряда – источника поля. Попробуем догадаться, какая это функция?



Интенсивность силового поля E – векторная функция, определенная в каждой точке пространства вокруг точки – источника поля. Графически «векторное поле сил» можно визуализировать с помощью т.н. “силовых линий” – направленных линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора поля в данной точке. Из соображений симметрии, силовые линии поля, создаваемого точечным источником, могут быть только радиальными, направленными или к источнику, или от него. Других вариантов просто нет.



Вспомним механику жидкостей

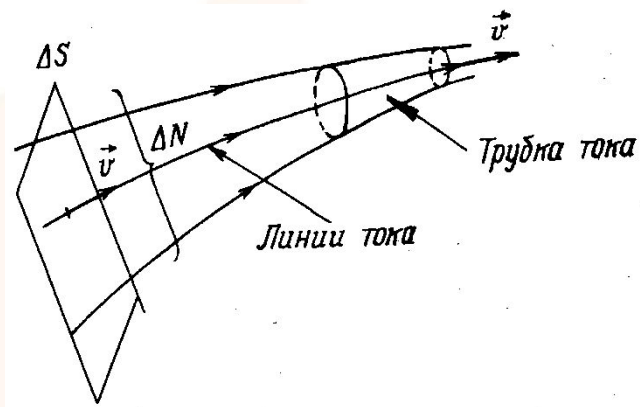


- 1) Частица жидкости - малый объем ее dV , имеющий, подобно материальной точке, определенные координаты и скорость $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$
- 2) Вектор скорости в каждой точке зависит от ее координат и – для нестационарного потока – от времени.
- 3) Совокупность векторов скорости для всех точек течения образует *поле вектора скорости*.

Поле вектора – это тот-же самый математический объект, что мы хотим использовать для описания силовых полей $\mathbf{E}(\mathbf{r})$. Правила работы с ним, понятия и определения, применявшиеся для векторного поля $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ в гидродинамике, можно с успехом применить и в физике силовых полей. Например, как величина скорости потока пропорциональна плотности линий скорости, так и интенсивность силового поля пропорциональна плотности силовых линий!

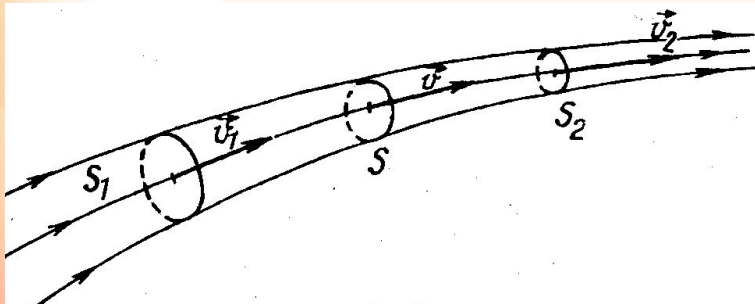


Основные понятия и определения

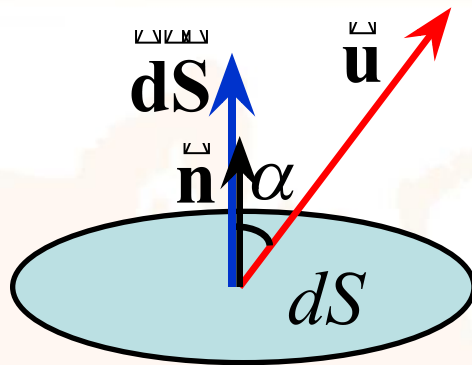


Линия тока - плавная линия, в каждой точке которой скорость частиц жидкости направлена по касательной

Точно такие-же линии можно ввести для визуализации силового поля, создаваемого зарядом того или иного рода. И определения, и свойства этих линий аналогичны



Для силового векторного поля, как и для поля скоростей, можно ввести, например, понятие потока вектора через заданную площадку.



$$d\Phi = u dS \cos \alpha$$

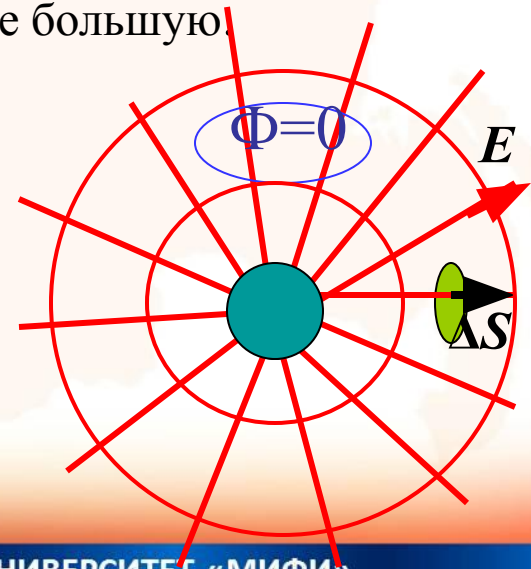
$$d\mathbf{S} = dS \mathbf{n}$$

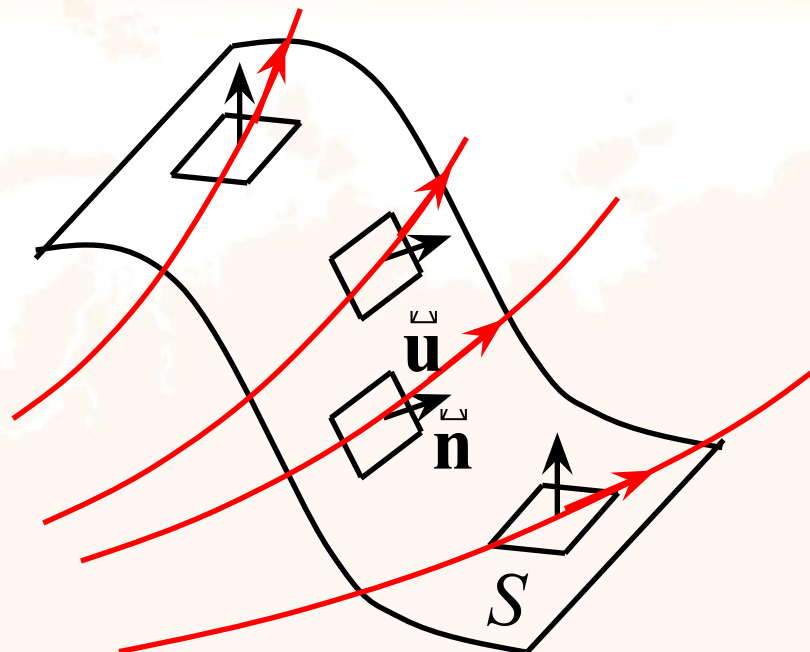
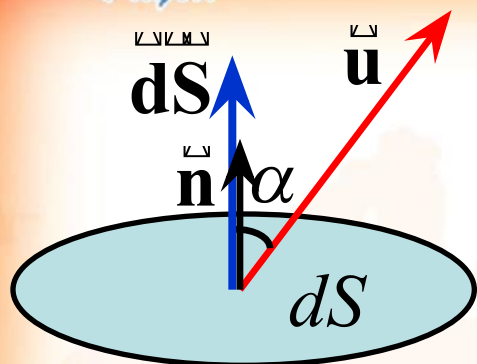
$$d\Phi = \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}$$

Определение:

Если площадка dS дифференциально мала (почти точечная), то *элементарный поток* вектора \mathbf{u} через нее $d\Phi = (\mathbf{u}, d\mathbf{S})$ – Вектор $d\mathbf{S}$ считаем направленным по нормали к площадке.

Поток вектора Φ через большую поверхность S вычисляется как сумма (интеграл) элементарных потоков $\Delta\Phi$ через все микроскопические площадки dS , составляющие большую





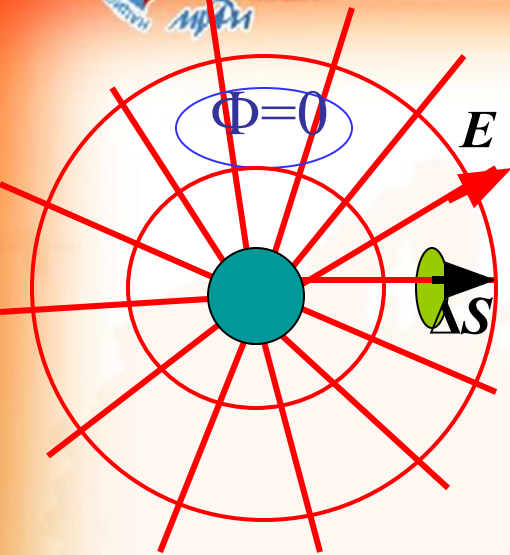
$$d\Phi = u dS \cos \alpha$$

$$\Phi = \int_S \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ: Поток вектора Φ через большую поверхность S вычисляется как сумма (интеграл) элементарных потоков $\Delta\Phi$ через все микроскопические площадки dS , составляющие большую. Поток пропорционален числу силовых линий, пронизывающих площадку (с учетом их направления)



Поток вектора интенсивности силового поля



ОПРЕДЕЛЕНИЕ: для силового поля E скалярное произведение $\Delta\Phi = (E, \Delta S)$ – элементарный поток вектора поля E через площадку ΔS . Вектор ΔS направлен по нормали к площадке. Поток Φ через большую поверхность S вычисляется как сумма (интеграл) элементарных потоков $\Delta\Phi$ через все малые площадки, составляющие поверхность.

В частности: поток вектора поля E через сферическую поверхность с центром в точке - источнике поля, очевидно равен $\Phi = SE = 4\pi r^2 E = 4\pi r^2 Qf(r)$.

Поток пропорционален числу линий, пронизывающих поверхность, которое очевидно будет одним и тем же для сферы любого радиуса r . Следовательно:

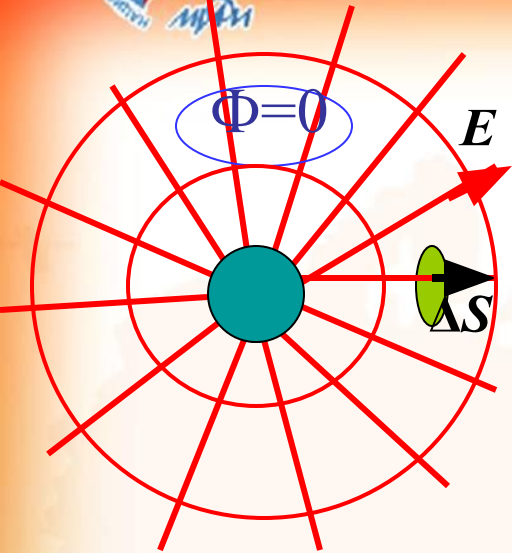
$$\Phi = 4\pi r^2 Qf(r) = \text{Const}(r) \Rightarrow f(r) = \text{Const} / r^2.$$

Без-контактная сила *любой природы*, действующая между двумя точечными зарядами, создающими сферически симметричные силовые поля, может зависеть от расстояния

между зарядами одним единственным образом: $F \sim 1/r^2$ (!!). Это не экспериментальное наблюдение – это следствие чисто логического анализа!!!.



Inevitable Law!



Без-контактная сила *любой природы*, действующая между двумя точечными зарядами, создающими сферически симметричные силовые поля, может зависеть от расстояния между зарядами одним единственным образом: $F \sim 1/r^2$ (!!). ВАЖНО: это справедливо только в пространстве 3-D! (Любознательным: Для N-D $F \sim 1/r^{N-1}$)

А что же опыт? Так оно и есть!

Закон гравитации (4-ый закон Ньютона): $F = GMm / r^2$)

Закон Кулона для электрических зарядов: $F = kQq / r^2$ -

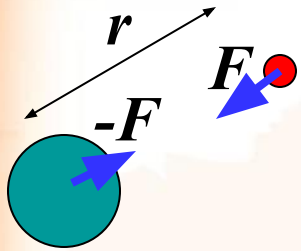
Модель зарядов и полей, похоже, действует! Продолжим с ней работать!



Запись двух известных из школы законов без-контактных сил выглядит похоже, но не тождественно:

Закон гравитации: $F = GMm / r^2$

Закон Кулона: $F = kQq / r^2$



В системе СИ- эл. заряды измеряются в Кулонах а константа $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кул}^2$.

В физической (Гауссовой) системе $k = 1$. заряды измеряются в $[\text{Н}^{1/2} \cdot \text{м}] = 10,5 \text{ мкКл}$

В Гауссовой системе можно определить **гравитационный заряд** как: $Q = G^{1/2} M$,

Он измеряется в тех же единицах $[\text{Н}^{1/2} \cdot \text{м}]$, что и электрический, и два закона взаимодействия принимают тождественно идентичную форму:

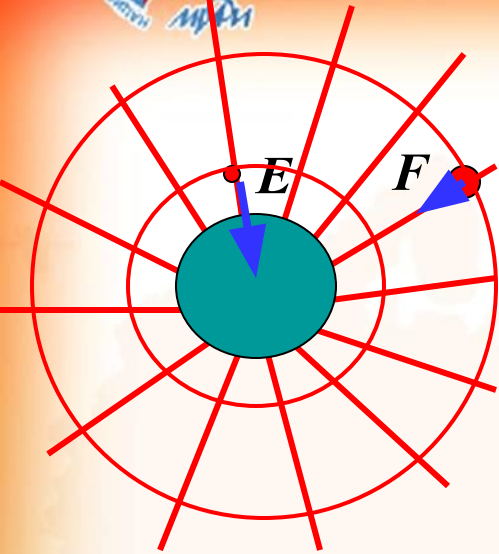
$$F = Qq / r^2$$

Единственная разница: физ. смысл обозначений Q и q. В одном случае это гравитационный заряд (он есть у любого тела, имеющего массу), в другом – это заряд электрический (он есть не у всех тел).

ВОПРОС: Зачем Природе ДВА как-бы одинаковых взаимодействия?



Гравитация и электростатика: в чем разница?



Общее между гравитацией и электричеством – закон взаимодействия точечных зарядов:

$$F = Qq / r^2$$

Разница состоит в природе и свойствах этих зарядов.

Гравитационный всегда *положителен* и строго пропорционален инерционной массе тела: $Q_g = G^{1/2}M$

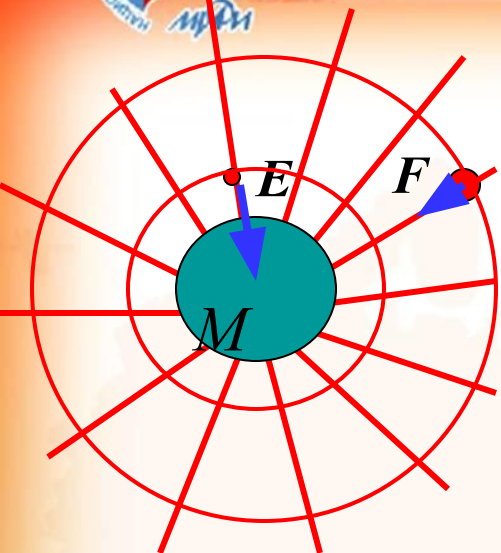
ВАЖНО: инерционная масса (из 2-го закона Ньютона) есть мера инерционности тела. Гравитационный заряд – это мера способности тела вступить в гравитационное взаимодействие. Это два абсолютно разных физических свойства! Сам факт их строгой взаимо-пропорциональности – удивителен и загадочен! Тем не менее, это строго установленный физический факт!

ВАЖНО! Все гравитирующие массивные тела притягивают друг-друга!

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия отрицательна и растет с увеличением расстояния между телами: $U = - Qq / r = - GMm / r$



Гравитация и электростатика: в чем разница?



Общее между гравитацией и электричеством – закон взаимодействия точечных зарядов:

$$F = Qq / r^2$$

Разница состоит в природе и свойствах этих зарядов.

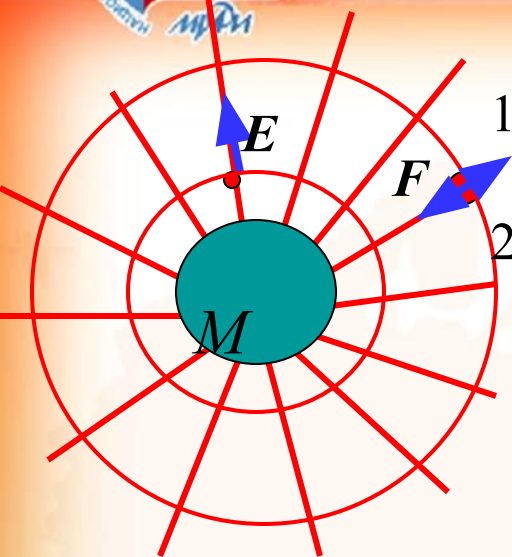
Электрический заряд бывает и *положительным*, и *отрицательным*. Он *никак не связан* с инерционной массой тела:.

Потенциальная энергия электростатического взаимодействия тоже определяется иначе (знак!), чем для гравитационного : $U = +Qq / r$.

Разница в знаке очень важна. Как следствие, заряды одного знака (оба положительные или оба отрицательные) не притягиваются, а отталкиваются! А , вот заряды противоположных знаков – притягиваются.



Гравитация и электричество: в чем разница?



Разница состоит в природе и свойствах этих зарядов.

1. Гравитационный заряд всегда **положителен** и строго пропорционален инерционной массе.

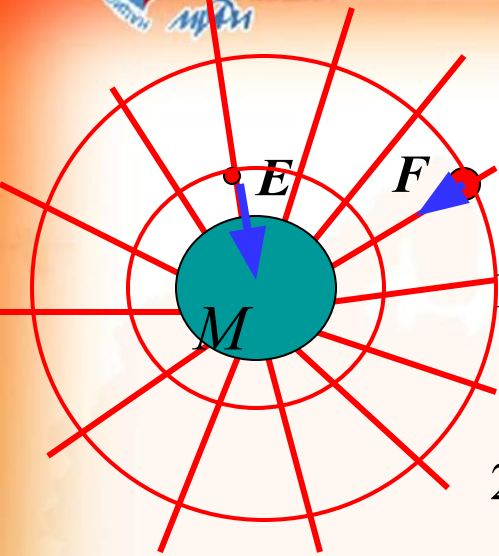
2. Электрические заряды бывают 2-х сортов (положительные и отрицательные) и с инерционной массой никак не связаны.

2. Гравитационный заряд (и масса) могут у разных тел иметь какие-угодно (положительные) значения без каких-либо ограничений). В противоположность этому, электрические заряды дискретны и строго кратны т.н. элементарному электрическому заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C in SI units system (or $4,8 \cdot 10^{-10}$ N^{1/2} * m in 'physical system of Units').

3. Огромна и разница в интенсивности двух взаимодействий. В микромире электрическое взаимодействие подавляюще сильнее гравитационного. Например, для протона гравитационный заряд, $q = mG^{1/2}$, измеренный в N^{1/2} * m составляет $\sim 10^{-18}$ от элементарного электрического (!). В микромире гравитация не имеет значения!



Гравитация и электричество: в чем разница?



В микромире гравитация не играет роли, зато в макро- и мега- мире она куда как заметнее сил электрических. Это потому, что

1. Электрические заряды могут иметь разные знаки. 2. Притягиваясь, они формируют устойчивые связанные структуры (атомы).
- 2.3. Электрические заряды точно кратны элементарному, Заряды разных знаков точно компенсируют друг-друга. Извне такие структуры воспринимаются как электро-нейтральные.

Массивные структуры составленные из электронейтральных атомов практически не проявляют электрических свойств, что дает шанс гравитации проявить свою силу, особенно значимую в мега-мире..

Два «похожих» взаимодействия по-разному действуют в разных масштабах. Оба они необходимы для формирования структуры Материи и Вселенной, способной создавать сложные формы. И не только эти два взаимодействия нужны.....



Электрическая природа контактных взаимодействий.



В макро-мире электрические взаимодействия только кажутся незаметными. На самом деле, они играют огромную роль! По сути, все контактные силы – трение, реакция опоры, вес, сила упругости и т.п. – есть проявления электрического взаимодействия электронных оболочек атомов, составляющих приповерхностные слои контактирующих тел. !!

Для инженерных и практических целей изучение электрических (и тесно связанных с ними магнитных) сил крайне необходимо.

Электрические и магнитные явления: это то, что мы будем изучать в 3-м семестре Курса Общей Физики НИЯУ МИФИ!

И начнем с короткого исторического обзора...



Поля и взаимодействия

Лекция 01-2

Исследование электрических явлений.
Краткий исторический обзор

Доцент, Андрей Станиславович ОЛЬЧАК



Исследования электричества в Древности

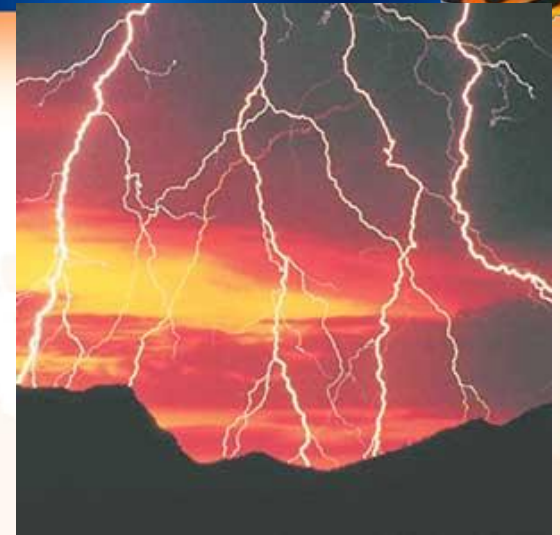


Атмосферные электрические явления люди наблюдали всегда, и долгое время обожествляли их, не понимая в чем их природа.

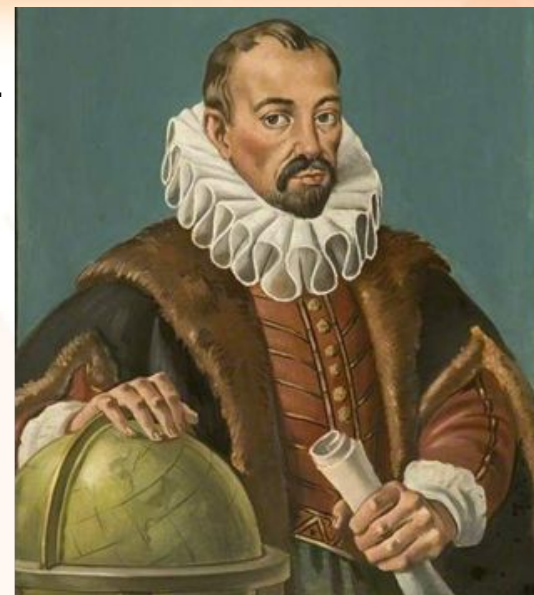
Еще за ~1000 лет до н.э. греки заметили странные свойства у янтаря, который использовали для украшений. Натертый шерстью, янтарь приобретает свойство притягивать волосы и мелкие соринки. .

Янтарь по.(древне)-гречески ηλεκτρόν *electron*. Отсюда термин электричество. .

Аристотель знал о странных свойствах янтаря, но не считал это явление сколько-нибудь важным и никак не ассоциировал ни с грозой, ни с молниями.



Первое серьезное исследование электрических явлений выполнил William Gilbert (1544-1603) в Англии. В 1600 году он опубликовал 6-томный трактат «*О магните, магнитных телах и большом магните — Земле*») для эффектов, подобных янтарному, ввел термин *electricity*. Он нашел много материалов, проявлявших подобные свойства и предложил делить все объекты на электризуемые (янтарь, шерсть, сера, смола....) и не-электризуемые (металлы, многие камни и др.).



Труд Гилберта активно использовали в изучении электрических и магнитных явлений вплоть до конца 18-го века!!.



В 1733 году француз Charles du Fey установил существование как минимум двух разных сортов электричества. Один сорт он получал, натирая стекло шелком и назвал его «стеклянным эл-вом». Другой сорт – получаемый натирая сухую смолу шерстью – он назвал «смоляным»..
Сегодня мы называем эти два сорта положительными и отрицательными зарядами соответственно.



Важнейший шаг сделал *Pieter van Musschenbroek* (1692-1761) из Leyden University (Netherlands). В 1746 он продемонстрировал устройство, позволяющее аккумулировать электрические заряды в больших количествах (*Лейденская банка* = конденсатор). Заряды по-прежнему генерировались трением



Ван Мушенбрук стал первым исследователем, ощутимо пострадавшим при лабораторных опытах с электричеством. Он сам описал свои ощущения такими словами: “... моя правая рука получила удар такой силы, что все тело мое содрогнулось, как от удара молнии ... Я думал, мне конец.. ...”

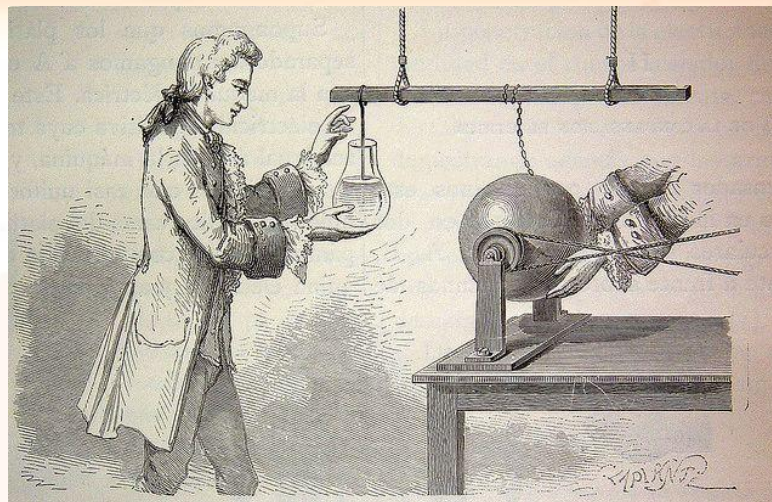
После таких опытов, связь лабораторных и атмосферных электрических явлений перестала казаться просто фантазией



В 18-м веке эксперименты с электризацией и Лейденскими банками были популярны не только в университетских лабораториях, но и как публичные шоу.

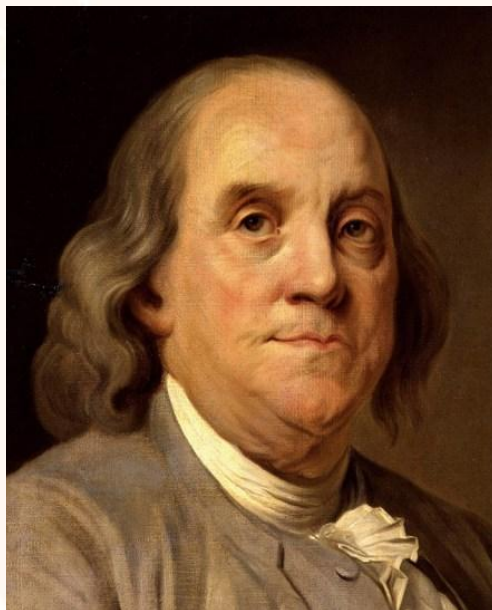
Как обычно, наибольшие внимание публики и печати привлекали самые тупые и бессмысленные опыты.

Серьезные исследования в эти годы были направлены на изучение атмосферного электричества и его связи с электрическими явлениями, наблюдаемыми в лаборатории



Серьезные исследования в эти годы были направлены на изучение атмосферного электричества и его связи с электрическими явлениями, наблюдаемыми в лаборатории

Большой вклад в исследование атмосферного электричества внес американец **Benjamin Franclin** (1706-1790). Именно он, в частности, изобрел устройство для защиты от молний - the lightning-rod (громоотвод), которое используется и сегодня. Портрет Франклина можно увидеть на любой 100-\$ купюре

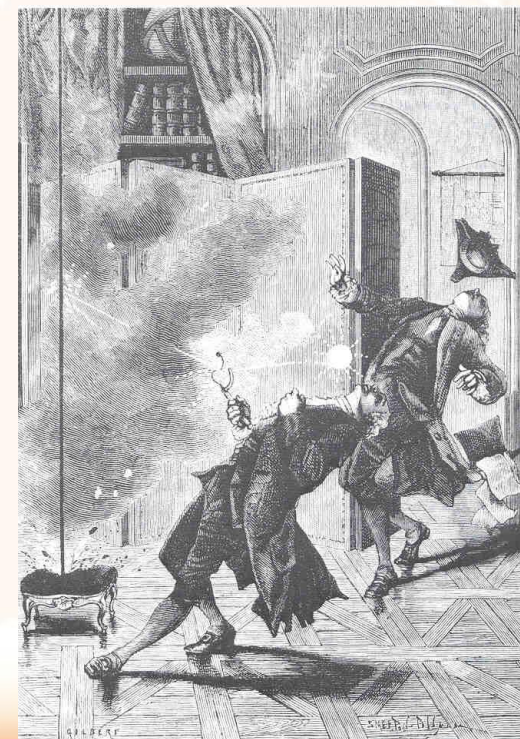


Известный русский исследователь **Михайло Ломоносов** (1711 - 1766) тоже отметил в исследовании атмосферного электричества. Именно ему принадлежит весьма неудачный термин *громоотвод*. В одном из его опытов с громоотводом в 1753 году, его ассистент Georg Richmann во время грозы получил смертельный удар током и погиб, став одной из первых жертв научных исследований.



Михайло Васильевич Ломоносов 1711—1766

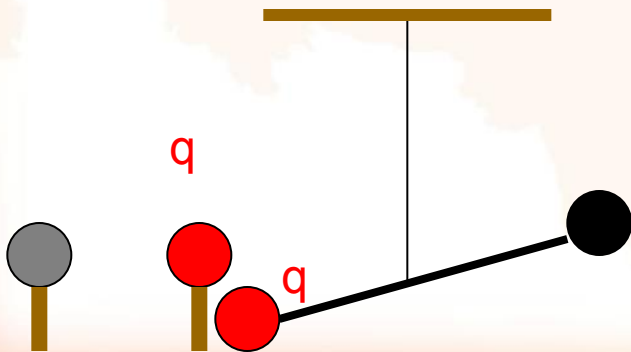
Позднее, в 19-м, а особенно в 20-м веках, число таких жертв сильно возрастет.....



Главное отличие физики от других областей исследований состоит в определяющей роли математики. Решающий шаг, сделавший исследования электрических явлений частью физики, сделал Французский инженер Charles Augustine de Coulomb (1736-1806). С помощью крутильных весов, он в 1785 году экспериментально измерил силу взаимодействия заряженных объектов и установил зависимость ее от расстояния, известную как закон Кулона. Мы с вами уже знаем, что это не просто экспериментальный факт, а единственно возможный закон взаимодействия точечных зарядов в 3-D пространстве.



Charles Augustine
de Coulomb
(1736 – 1806)





NERPhI General Physics



В следующей лекции мы подробно поговорим о Законе Кулона, об электрических полях и о принципе суперпозиции полей.