



# Электростатика

## Электрические заряды

# Электрические заряды

**Электростатика** – раздел физики, в котором изучается взаимодействие неподвижных электрических зарядов (электростатическое взаимодействие).

**Электрический заряд** – физическая величина, характеризующая способность тел и частиц к электрическим взаимодействиям.

# Фундаментальные взаимодействия в природе

Вид	Взаимодействующие частицы	Проявление	Механизм	Интенсивность	Радиус действия, м
<b>СИЛЬНОЕ</b> 	тяжёлые частицы (кварки, нуклоны)	ядерные силы, обеспечивающие существование ядер	обмен глюонами	1	$10^{-15}$
<b>ЭЛЕКТРО-МАГНИТНОЕ</b> 	заряженные частицы, фотоны	кулоновская сила, обеспечивающая существование атома	обмен фотонами	$\frac{1}{137}$	$\infty$
<b>СЛАБОЕ</b> 	кварки лептоны	$\beta$ - распад	обмен бозонами	$10^{-10}$	$10^{-18}$
<b>ГРАВИТАЦИОННОЕ</b> 	все тела Вселенной	всемирное тяготение, обеспечивающее существование звезд, планетных систем	обмен гравитонами ?	$10^{-38}$	$\infty$

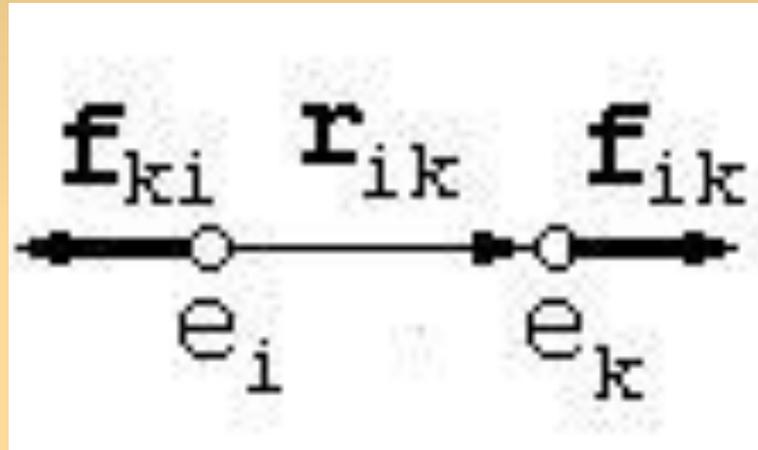
# Электростатические взаимодействия легко отличить от других типов фундаментальных взаимодействий:

- Ядерные взаимодействия оказываются существенно более короткодействующими и экспоненциально спадают с расстоянием между частицами.
- Зависимость гравитационных сил от расстояния сходна с электростатическим взаимодействием. Различие состоит в масштабе возникающих сил (в атоме электростатические взаимодействия превосходят гравитационные в  $10^{42}$  раз). Гравитационные взаимодействия могут приводить к появлению только сил притяжения, в то время как при электростатических взаимодействиях между частицами различных типов могут возникать как силы притяжения, так и отталкивания.
- Между двумя неподвижными частицами помимо электростатических сил возможно возникновение ещё одного вида сил, обычно также относимых к электромагнитным взаимодействиям. Эти силы оказываются малыми по сравнению с электростатическими, быстрее спадают с расстоянием (обратно пропорциональны четвёртой степени расстояния между частицами) и, поэтому, легко отличимы от рассматриваемых.

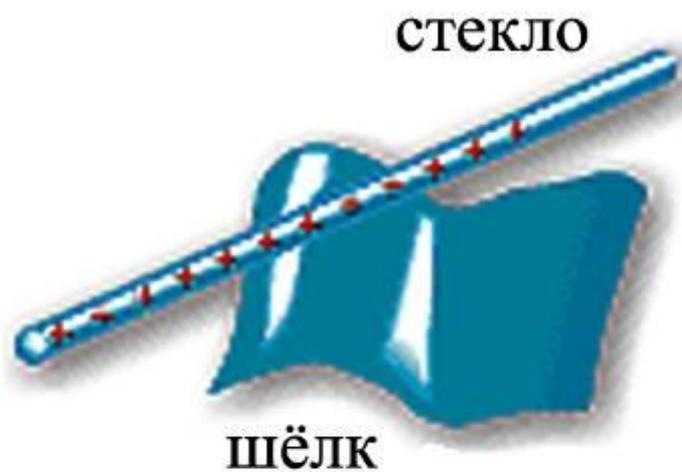
# Положительное и отрицательное электричество

В теории американского ученого Бенджамина Франклина в 1750 г. впервые было введено понятие положительного и отрицательного электричества (заряда) и их обозначение: «+» и «-», что оказалось весьма удобным, так как позволило описать все возможные случаи электростатического взаимодействия частиц – притяжение и отталкивание – при помощи единой формулы.

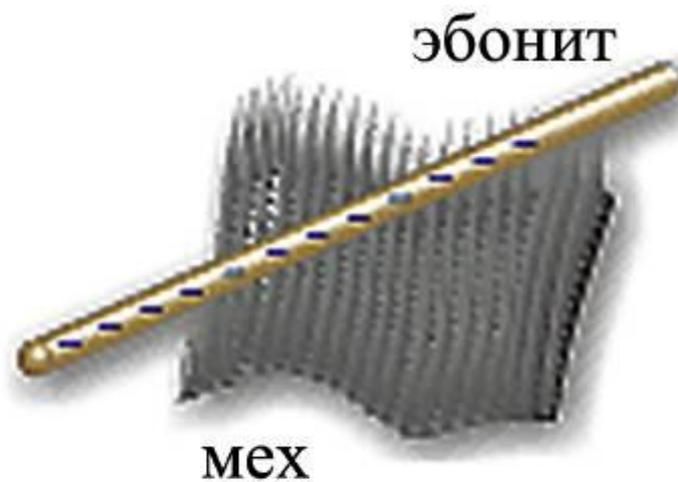
# Электростатическое взаимодействие между двумя одинаковыми зарядами $+q$



# Положительный и отрицательный заряды



**ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ**  
на стекле, потёртом о шёлк



**ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ**  
на эбоните (янтаре), потёртом о мех

# Закон сохранения зарядов

*Хороший эксперимент имеет больше ценности, чем глубокомыслие такого гения, как Ньютон.*

Гемфри Дэви (1779-1829).

Основатель электрохимии.

С Дэви началась материалистическая эпоха

торжества экспериментальной науки.

# Точечный заряд

**Точечный заряд** – заряд, сосредоточенный на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует. Понятие точечного заряда является физической абстракцией.

Иногда точечным зарядом называют наэлектризованное тело, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми оно взаимодействует. Данное определение имеет тот недостаток, что далеко не всегда даже маленькое (по сравнению с расстояниями до других тел) тело можно рассматривать как материальную точку.

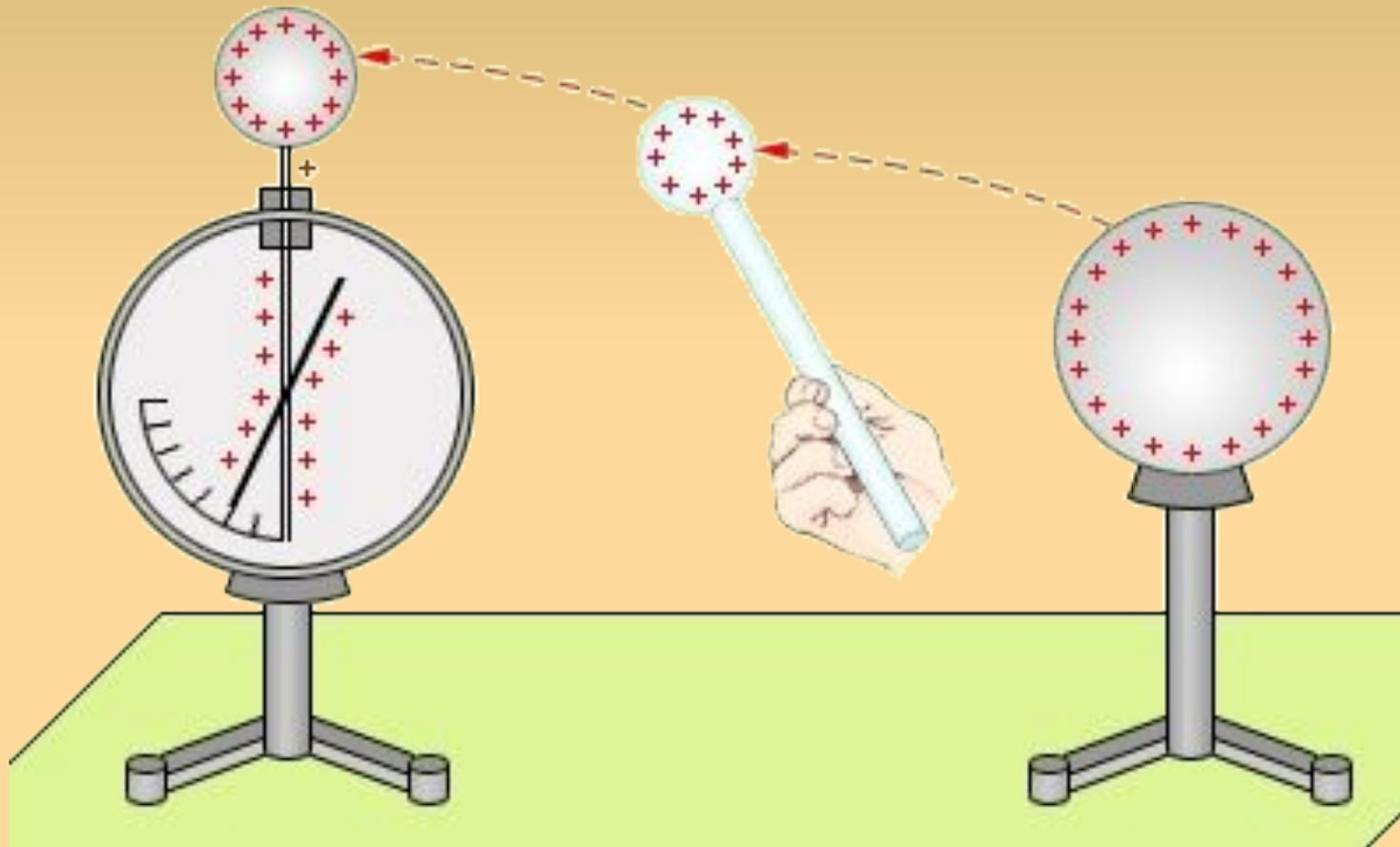
# Электрически замкнутая система

Систему, через границы которой не могут пройти заряды (заряженные частицы), называют электрически изолированной (закрытой, замкнутой). Незаряженные частицы, в том числе и фотоны (кванты), могут входить и выходить через границу такой системы.

# Закон сохранения электрического заряда

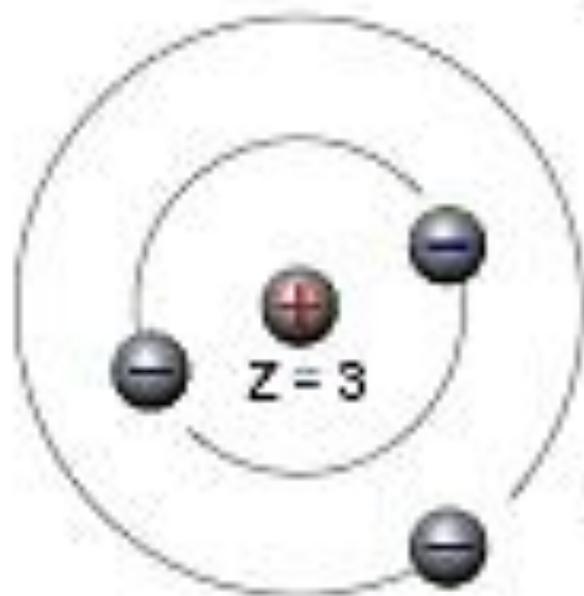
Полный электрический заряд замкнутой (изолированной, закрытой) физической системы, равный алгебраической сумме зарядов слагающих систему элементарных частиц (для обычных макроскопических тел – протонов и электронов), строго сохраняется во всех взаимодействиях и превращениях этой системы.

# Эксперимент по переносу зарядов



# Электрические заряды в атомах

Литий



Ядро атома  
содержит  
 $Z$  протонов

Около ядра  
располагается  
 $Z$  протонов

Кислород

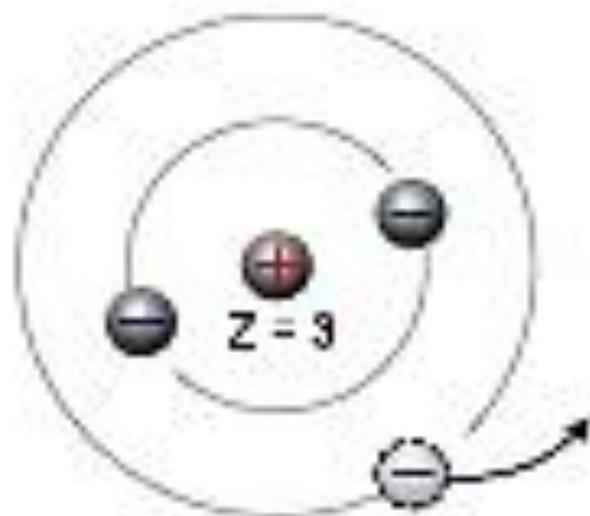


В нормальном состоянии атом нейтрален

$$q_+ + q_- = 0$$

# Электрические заряды в атомах

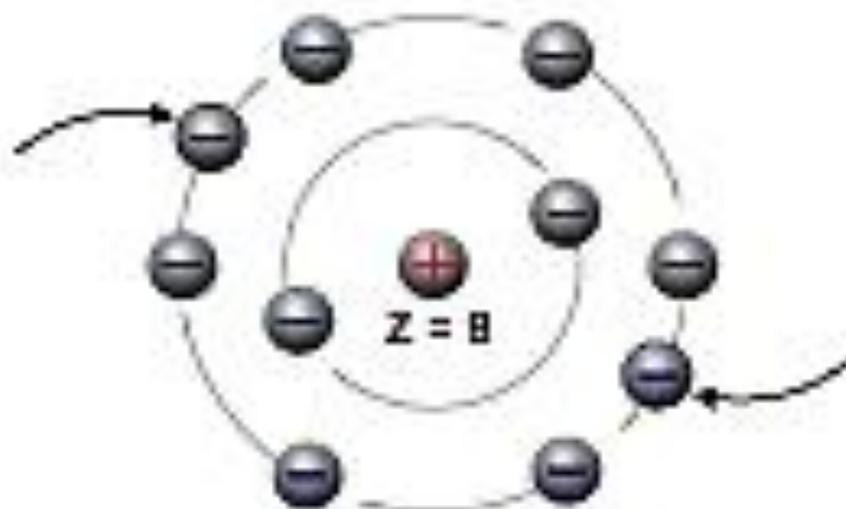
Атом может либо потерять,  
либо приобрести несколько электронов



Атом лития потерял  
электрон

$$q_+ > q_-$$

Такой атом называется  
**положительным ионом**



Атом кислорода  
приобрёл 2 электрона

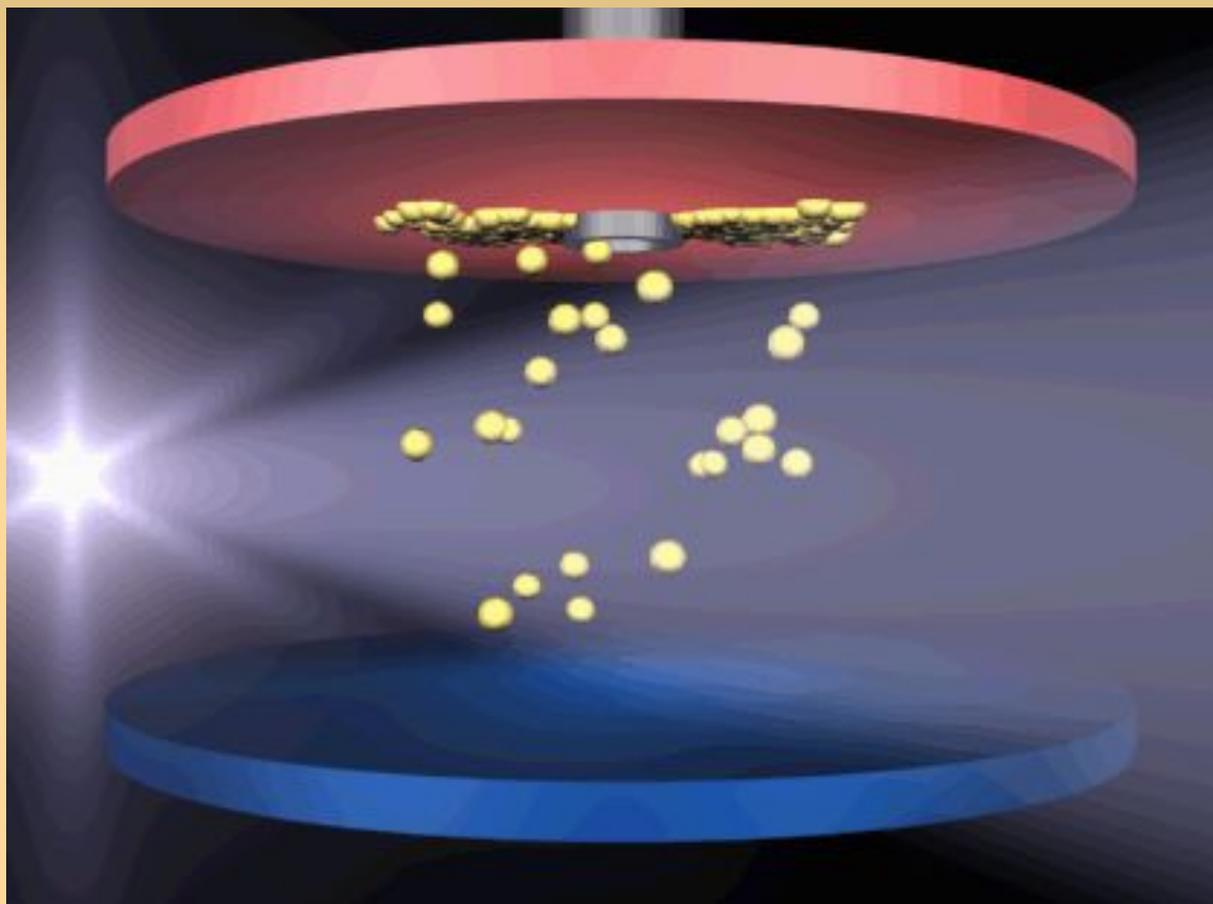
$$q_+ < q_-$$

Такой атом называется  
**отрицательным ионом**

# Опыты Милликена по определению заряда электрона

В 1909-16 гг. американский физик лауреат Нобелевской премии Роберт Эндрус Милликен (1868-1953) показал, что в природе электрические заряды тел состоят из дискретных зарядов. Для этого Милликен взял стеклянный ящик, верх и дно которого были сделаны из металла. Эти металлические пластины были противоположно заряжены. Далее Милликен вспыскивал в ящик масло через отверстие в верхней пластине. При распылении капельки масла заряжались, и, попадая в конденсатор, двигались под действием силы тяжести и приложенного электрического поля. Освещением рентгеновскими лучами можно было слегка ионизировать воздух между пластинами конденсатора и изменять заряд капли. Учёт вязкости воздуха позволил Милликену вычислить величину минимального электрического заряда.

# Опыты Милликена по определению заряда электрона



**Взаимодействие  
электрических зарядов;  
закон Кулона**

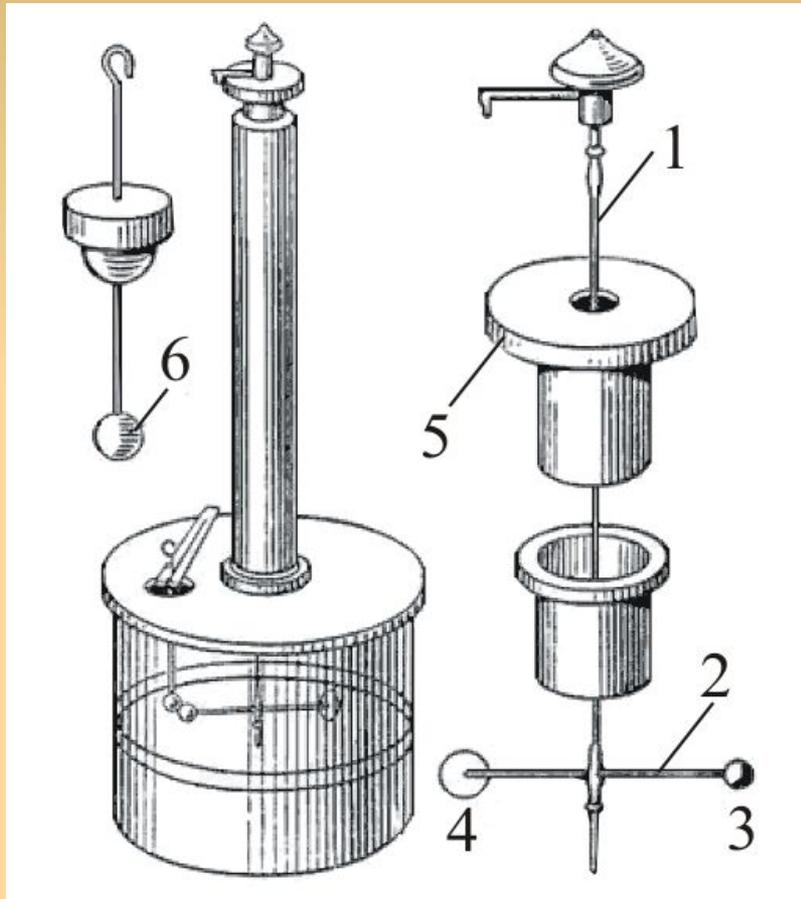
# Эксперименты Кулона

Изучая законы закручивания нитей и проволок под действием внешней механической силы, французский инженер **Шарль Огюстен Кулон** (1736-1805) нашёл, что упругая сила, возникающая при закручивании, пропорциональна углу закручивания и зависит от длины нити (проволоки), её диаметра и материала, из которого она изготовлена. Используя обнаруженные зависимости, Кулон в 1784 г. сконструировал и изготовил установку, получившую название «крутильные весы».

**Французский инженер и физик  
Шарль Огюстен Кулон  
(14.06.1736-23.08.1806)**

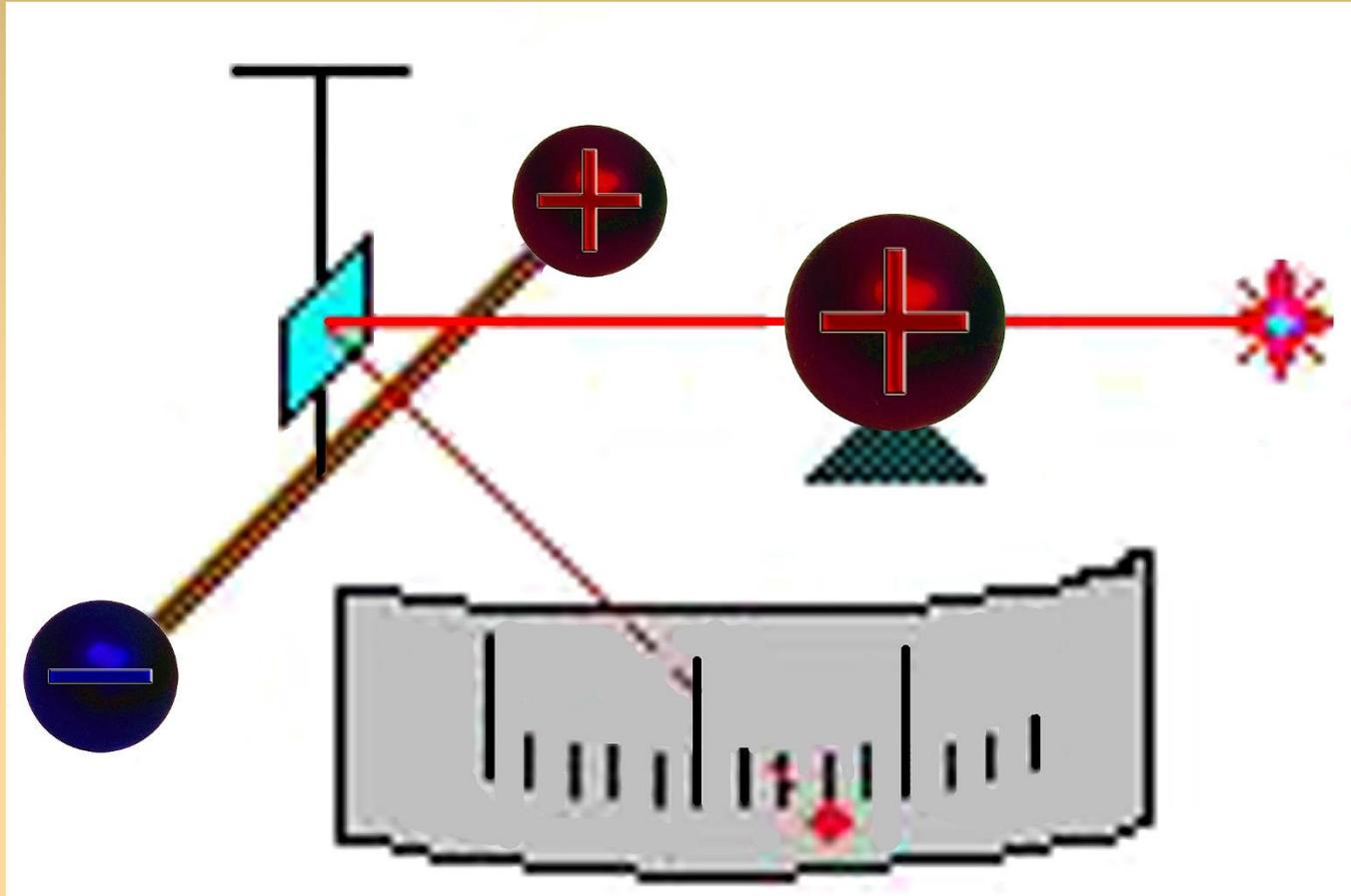


# Крутильные весы Кулона:



**1 – упругая нить с  
подвешенным на ней  
горизонтальным рычагом 2;  
3 и 4 – проводящие шарики,  
укреплённые на концах  
рычага;  
5 – шкала;  
6 – заряженный шарик**

# Схема опыта Кулона (1785 г.)



# Закон Кулона

Сила взаимодействия неподвижных точечных зарядов прямо пропорциональна произведению их величин, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена в изотропном пространстве вдоль прямой, соединяющей эти заряды:

$$|\mathbf{F}| \sim \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

# Закон Кулона

Рихман утверждал: «электрическая материя, неким движением возбуждаемая вокруг тела, по необходимости должна опоясывать его на некотором расстоянии; на меньшем расстоянии от поверхности тела действие её бывает сильнее; следовательно, при увеличении расстояния сила её убывает по некоторому, пока ещё неизвестному закону». Таким образом, Рихман ещё в начале 1750-х гг. (за 40 лет до Кулона) открыл существование электрического поля вокруг заряженного тела, напряжённость которого убывает с увеличением расстояния от тела.

# Закон Кулона

В 1759 г. Эпинус постулировал, что сила электрического взаимодействия пропорциональна электрическим зарядам и уменьшается пропорционально квадрату расстояния, но экспериментально это не подтвердил.

Экспериментально с достаточной точностью будущий закон Кулона впервые был доказан ещё в 1771-73 гг. английским физиком Генри Кавендишем (Henry Cavendish, 1731-1810) из значительно более точных, чем у Кулона, но косвенных измерений.

Он также изобрёл и крутильные весы.

# Диэлектрическая проницаемость среды

Влияние той или иной среды на величину электрического взаимодействия между зарядами можно оценить, если сравнить силы взаимодействия между зарядами в отсутствие среды ( $F_0$ ) и при её наличии ( $F$ ). Назовём отношение сил **диэлектрической проницаемостью среды** и обозначим эту величину  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = F_0 / F$$

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  – безразмерная величина. Для пустоты (вакуума)  $\varepsilon = 1$ , для воздуха при 0 °С и атмосферном давлении 1,000594, для водяного пара 1,0126, для керосина 2, у сухой бумаги 2÷2,5, у эбонита – 2,7÷2,9, у стекла – 5÷16, у этилового спирта – 26,8, у воды – 81.

# Единицы измерения заряда

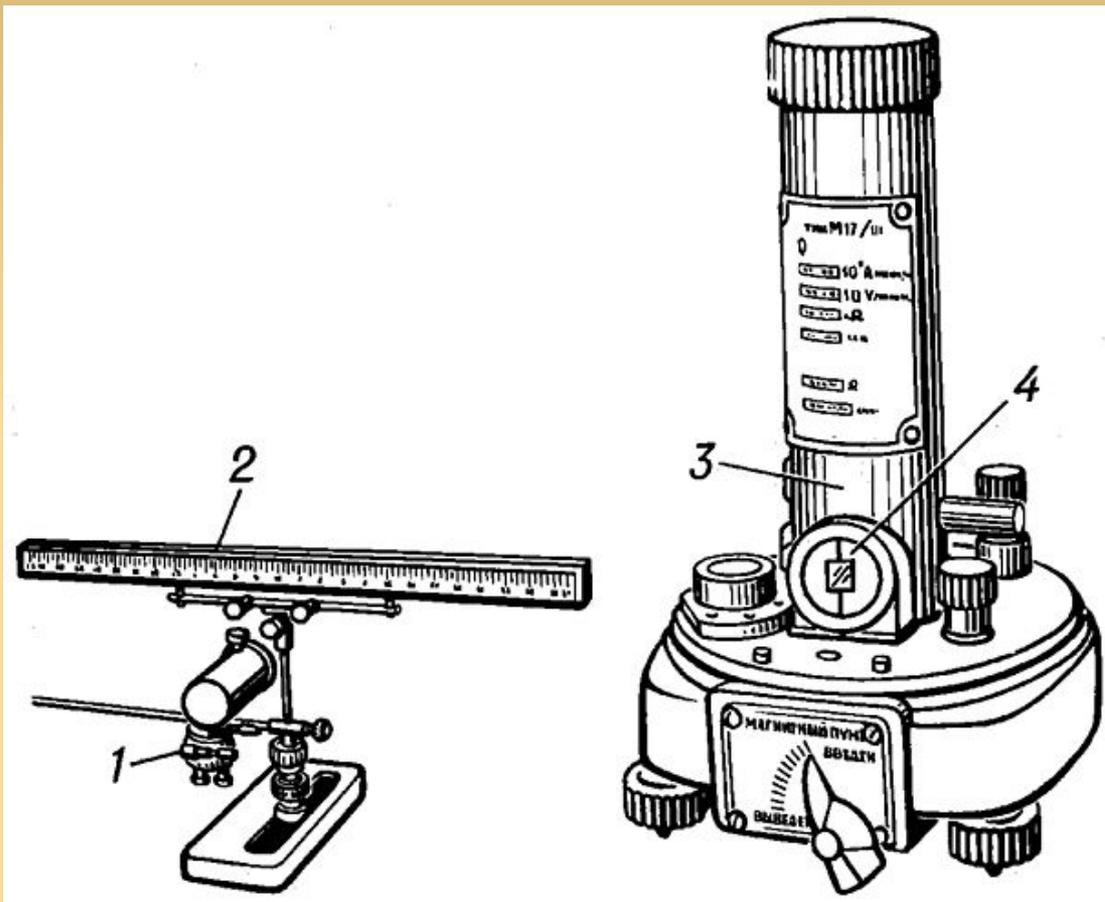
В системе СИ за единицу электричества принят **кулон** (Кл) – количество электричества, протекающее за 1 с через поперечное сечение проводника при токе в цепи, равном 1 А.

(Заряд протона  $1,60218 \cdot 10^{-19}$  Кл)

**Ампер-секунда** – единица количества электричества; то же, что кулон.

**Ампер-час** – внесистемная единица количества электричества, равная 3600 Кл. Обозначается а×ч. В ампер-часах обычно выражают заряд аккумуляторов.

# Зеркальный гальванометр:



- 1 – осветитель (лампа);
- 2 – шкала;
- 3 – гальванометр;
- 4 – зеркальце

При введении независимой единицы заряда закон Кулона должен содержать коэффициент пропорциональности, имеющий определённую величину и размерность:

$$|\mathbf{F}| = k_0 \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Электрическая постоянная  $\epsilon_0$  – физическая постоянная, входящая в уравнения законов электрического поля (в том числе, в закон Кулона) при записи этих уравнений в рационализированной форме, в соответствии с которой образованы электрические и магнитные единицы СИ.

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2 \text{ или } \text{Ф}/\text{м},$$

$$k = 1/4\pi\epsilon\epsilon_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$$

# Рационализованная форма

**Рационализованная форма** записи уравнений электромагнетизма была впервые предложена английским физиком Оливером Хэвисайдом (1850-1925). При рационализованной форме в знаменатели закона Кулона и закона Био–Савара–Лапласа ставится коэффициент  $4\pi$ . В результате этого в ряде уравнений, относительно часто встречающихся на практике, этот коэффициент исчезает, и уравнения приобретают более симметричный вид. В первую очередь это относится к уравнениям Максвелла. Такая «рационализация» упростила инженерные расчёты, но скрыла физический смысл формул.

**Закон Кулона в среде в системе СИ:**

$$|F| = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\epsilon_a} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

где произведение  $\epsilon_0 \cdot \epsilon \equiv \epsilon_a$  – **абсолютная диэлектрическая проницаемость данной среды.**

# Аналогии между механическими и электрическими взаимодействиями

Механика	Электростатика
<p data-bbox="112 615 736 758">Закон всемирного тяготения Ньютона</p> $ \mathbf{F}  = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$	<p data-bbox="981 615 1721 758">Закон взаимодействия электрических зарядов</p> <p data-bbox="981 779 1213 843">Кулона</p> $ \mathbf{F}  = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$