

Сергій Людомирович Парновський

Електрика та магнетизм

Лекція 1

Классификация сил в природе

- Гравитационные силы действуют между всеми телами – все тела притягиваются друг к другу. Но это притяжение существенно лишь тогда, когда хотя бы одно из взаимодействующих сил так же велико, как Земля или луна.
- Электромагнитные силы действуют между заряженными частицами. В атомах, молекулах, живых организмах именно они являются главными.
- Область ядерных сил очень ограничена. Они заметны только внутри атомных ядер(т.е. на расстоянии 10^{-12} см).
- Слабые взаимодействия проявляются на ещё меньших расстояниях. Они вызывают превращение элементарных частиц друг в друга.



joyreactor.cc



За вклад в объединённую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий между элементарными частицами, в том числе предсказание слабых нейтральных токов

Шелдон Ли Глэшоу, Абдус Салам, Стивен Вайнберг (1979)

Практичне застосування



Історія:

Біля 1600 Вільям Гілберт (англ. William Gilbert), електроскоп

1660 Геріке, куля з сірки

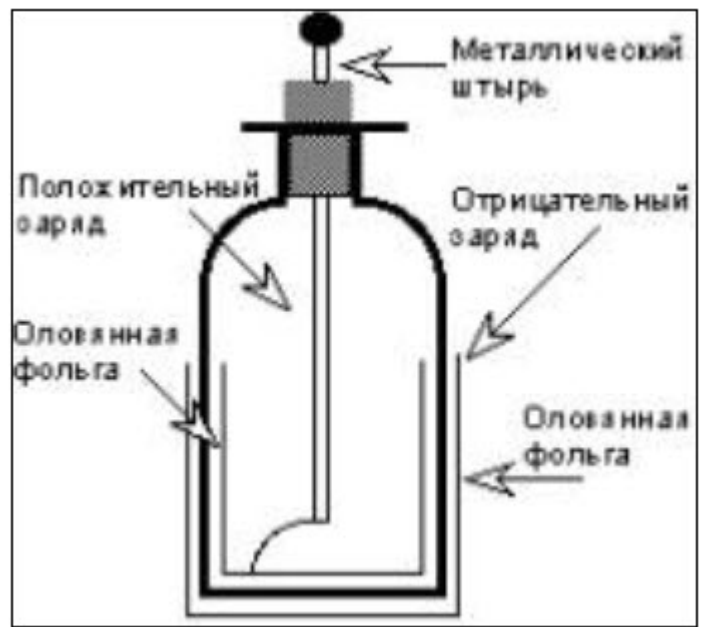
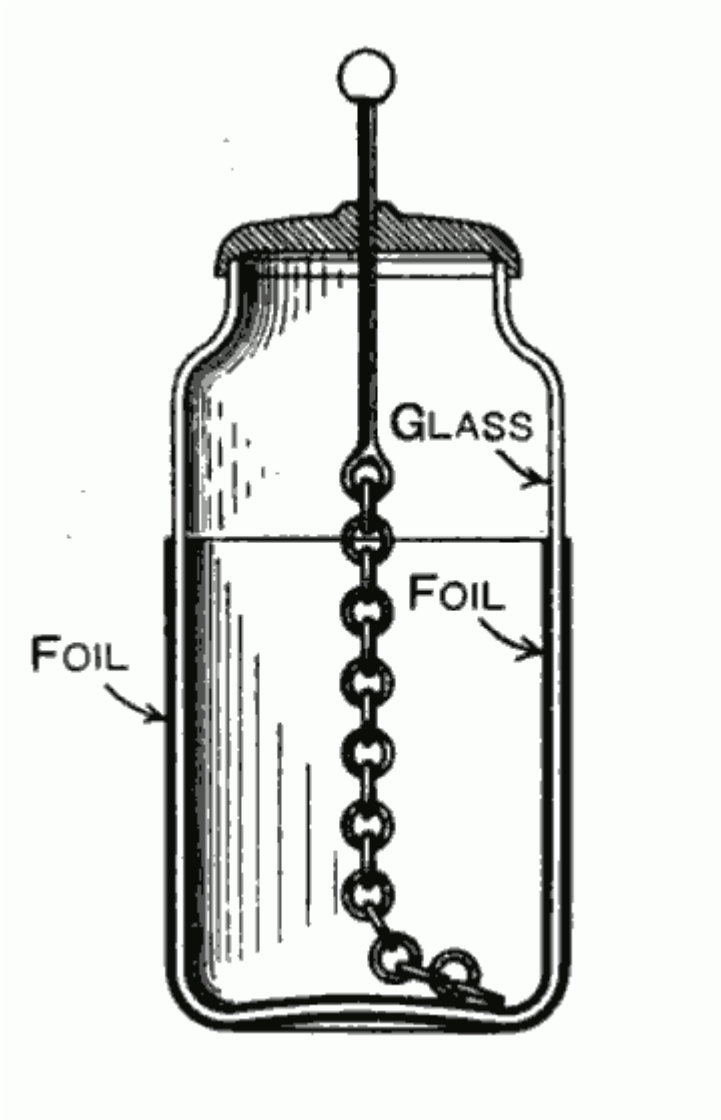
1733 Дюфі, скляна та смоляна електрика (один тип утворюється при терті скла об шовк, а інший - смоли об вовну.)

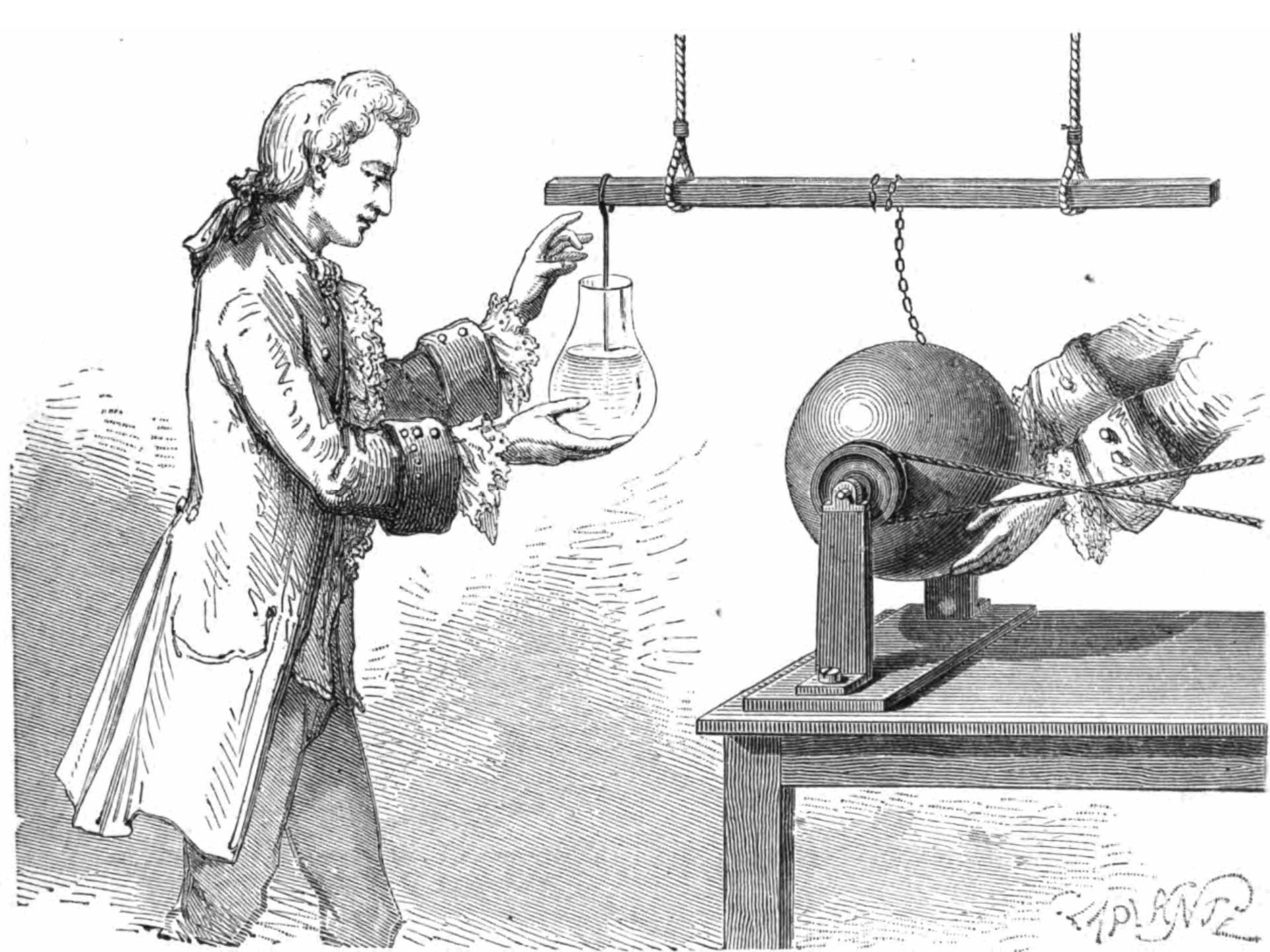
1745 Лейденська банка, відкрита незалежно Ewald Georg von Kleist та Pieter van Musschenbroek

1748 Франклін, додатній та від'ємний заряд

1785, Шарль Огюстен де Кулон (фр. Charles-Augustin de Coulomb)









«К концу продольной палочки крестовины [змея] прикрепляется очень сильно заостренный провод длиной в 1 фут или больше. К концу бечевки, ближайшему к руке, привязывается шелковая лента, а в месте соединения бечевки и ленты прикрепляется ключ. Змея нужно запускать при приближении грозы, а человек, держащий бечевку, должен стоять в дверях, за окном или под другим укрытием, чтобы шелковая лента не промокла. Нужно также позаботиться о том, чтобы бечевка не касалась дверной или оконной рамы. Как только какое-нибудь грозовое облако приблизится к змею, заостренный провод начнет вытягивать из него электрический огонь, и змей вместе с бечевкой наэлектризуется.

Волокна из бечевки вылезут во все стороны и будут притягиваться к пальцу, если его приблизить. Когда дождь намочит змея и бечевку так, что они станут свободно проводить электрический огонь, вы увидите, что он в изобилии вылетает из ключа, если приблизить к нему костяшки пальцев; от ключа можно зарядить лейденскую банку. От полученного таким образом электрического огня можно зажигать спирт и проводить все прочие электрические опыты, которые обычно делаются с помощью натертого шара или трубки. Тем самым была окончательно продемонстрирована одинаковость электрической материи с материей молнии».

Бенджамін Франклін (англ. Benjamin Franklin)

Деякі поважають Франкліна не за досліді з електрики.



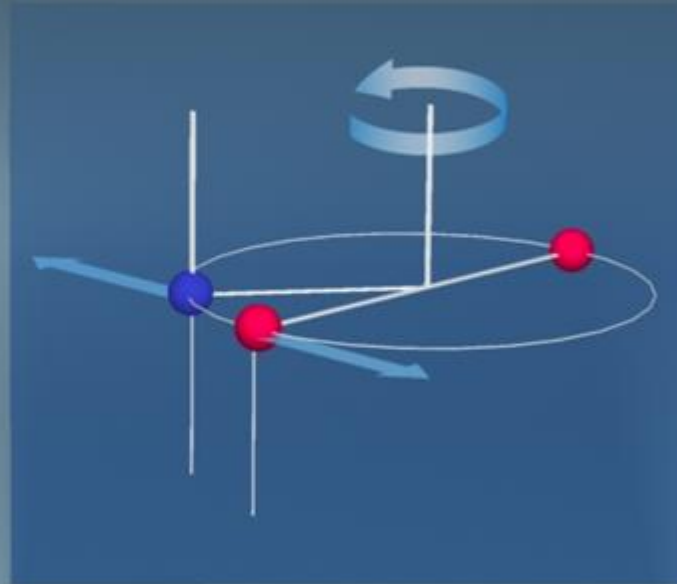
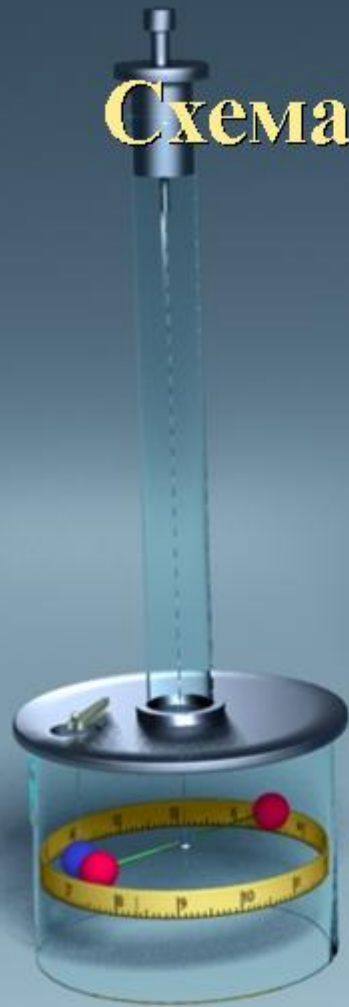
6 августа 1753 года во время грозы, когда Рихман стоял на расстоянии около 30 см от прибора, от последнего направился к его лбу бледно-синеватый огненный шар. Раздался удар, подобный пушечному выстрелу, и Рихман упал мёртвый, а находившийся тут же гравер Соколов был повален на пол и временно оглушён.

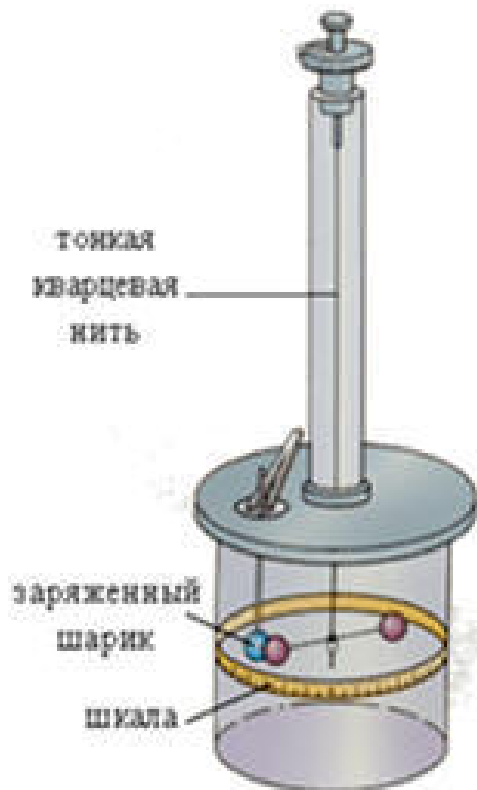
«...Красно-вишнёвое пятно видно на лбу, а вышла из него громовая электрическая сила из ног в доски. Ноги и пальцы сини, башмак разорван, а не прожжён...» Так описывал смерть своего соратника и друга в письме к графу Шувалову М. В. Ломоносов.



Трагическая гибель Г. В. Рихмана от удара шаровой молнии 26 июля 1753 г. Рисунок XIX века.

Схема опыта Кулона





шкала расстояния между сферами

упругая серебряная нить

изолирующий стержень (коромысло)

неподвижная заряженная сфера

маленька тонкая незаряженная золотая сфера



1° відхилення відповідає 3×10^{-9} Г

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

$$F \sim r^a, a = -2 \pm 10^{-7}$$

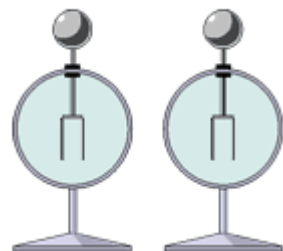
Електри́ческий заряд (колі́чество електри́чества) — это физическая скалярная величина, определяющая способность тел быть источником электромагнитных полей и принимать участие в электромагнитном взаимодействии. Впервые электрический заряд был введён в законе Кулона в 1785 году.

Единица измерения заряда в Международной системе единиц (СИ) — кулон — электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с. Заряд в один кулон очень велик. Если бы два носителя заряда ($q_1 = q_2 = 1$ Кл) расположили в вакууме на расстоянии 1 м, то они взаимодействовали бы с силой $9 \cdot 10^9$ Н, то есть с силой, с которой гравитация Земли притягивала бы предмет с массой порядка 1 миллиона тонн.

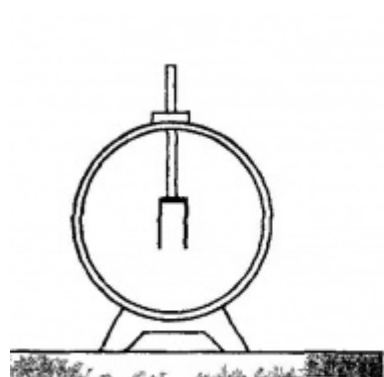
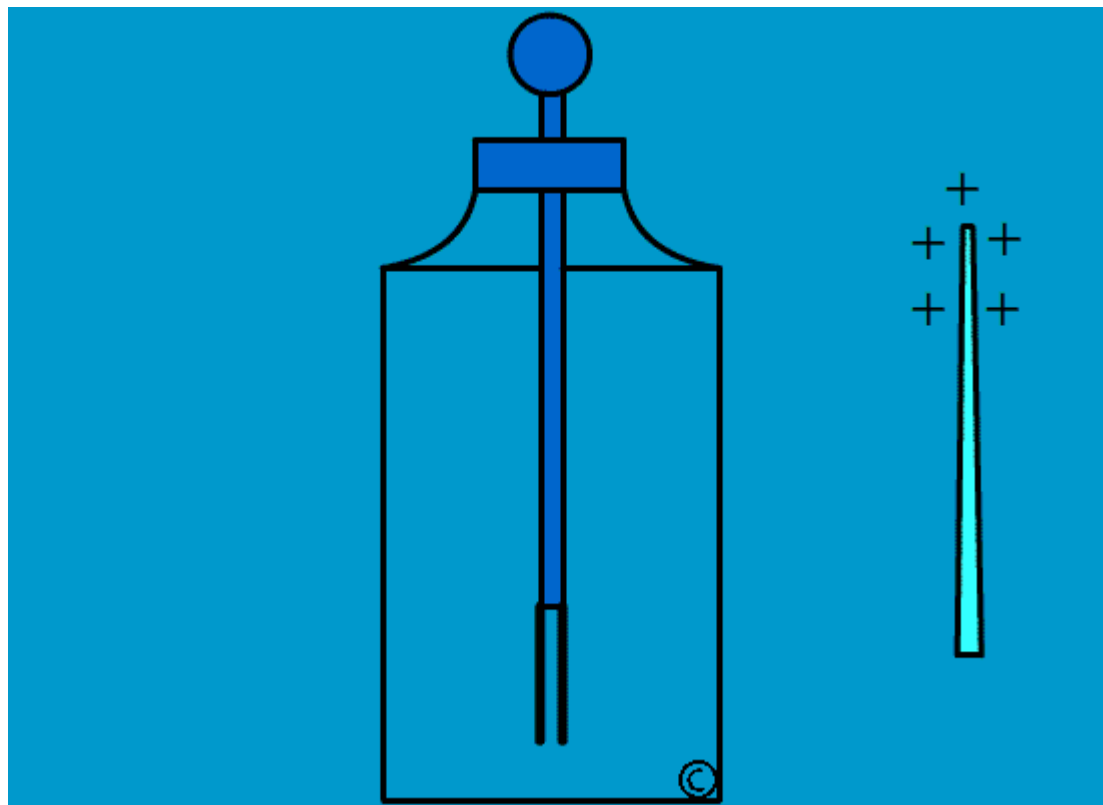
Електри́чний заряд — фізична величина, яка є кількісною мірою властивості фізичних тіл або частинок речовини, що вступають в електромагнітну взаємодію.

Додатні та від'ємні (позитивні та негативні) заряди.

Електроскоп



Збереження
заряду!



а

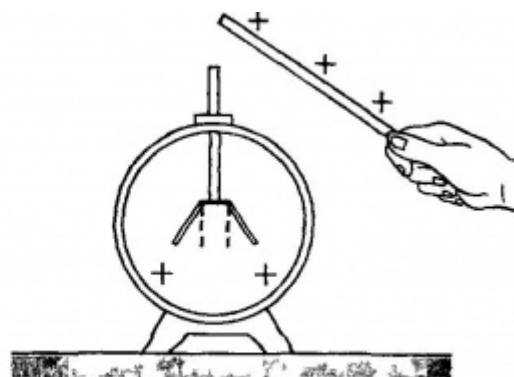
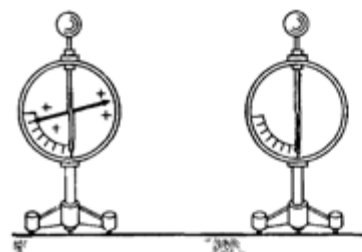


Рис. 8

б



а

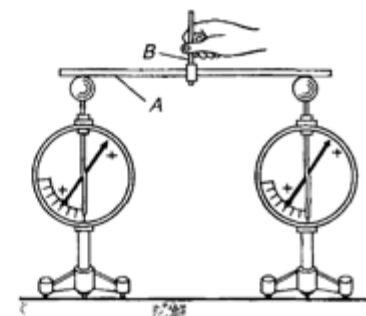


Рис.10

б

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}$$

СГС

$k=1$

$[q]=\text{г}^{1/2}\text{см}^{3/2}\text{с}^{-1}$

Одиниці:

Відстань см

Маса г

Час с

Швидкість см/с

Прискорення см/с²

Сила дина = г см/с² = 10⁻⁵ Н

Енергія ерг = г см²/с² = 10⁻⁷ Дж

Заряд 1 СГС_q = 1г^{1/2}см^{3/2}с⁻¹

СІ

$k=9 \times 10^9$ м/Ф

Кулон, 1 Кл = 3 × 10⁹ СГС_q

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Нм}^2}$$

Заряд квантується.

$e=1.6 \times 10^{-19}$ Кл = 4.8 × 10⁻¹⁰ СГС_q

Заряд q

Густина заряду ρ

Поверхнева густина заряду σ

Лінійна густина заряду λ

$$dq = \rho dV, \quad q = \int \rho dV$$

$$dq = \sigma dS, \quad q = \int \sigma dS$$

$$dq = \lambda dl, \quad q = \int \lambda dl$$

Елемент об'єму

$dV = dx \times dy \times dz$ Декартова система координат

$= r^2 \cos \theta dr \times d\varphi \times d\theta$ Сферическая система координат

$= R dR \times dz \times d\varphi$ Цилиндрическая система координат

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Кулонівське поле має напруженість

$$\vec{E} = k \frac{Q}{r^3} \vec{r}$$

У системі СГС одиницею є 1 СГСЕ

Принцип суперпозиції

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i$$

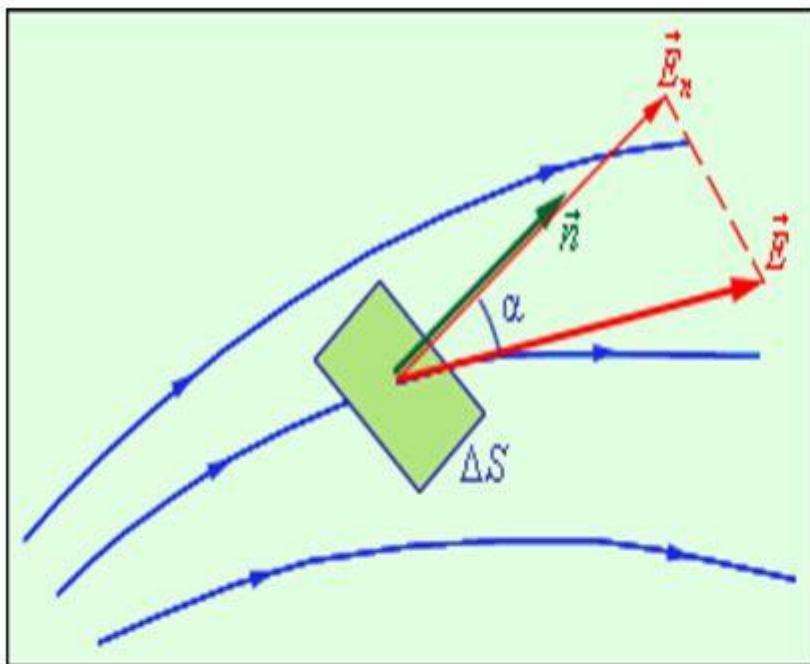
Введемо потік векторного поля \vec{a} через замкнену поверхню S

$d\vec{S}$ – елемент поверхні S, спрямований вздовж зовнішньої нормалі \vec{n} і за модулем рівний площі елемента dS.

$$\Phi = \oint_S \vec{a} d\vec{S} = \oint_S a dS \cos \alpha = \oint_S a_n dS$$

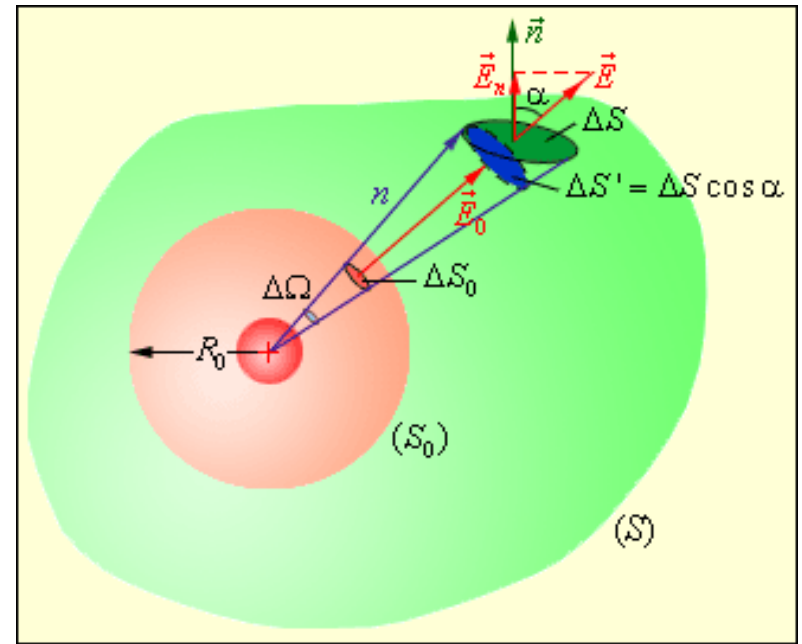
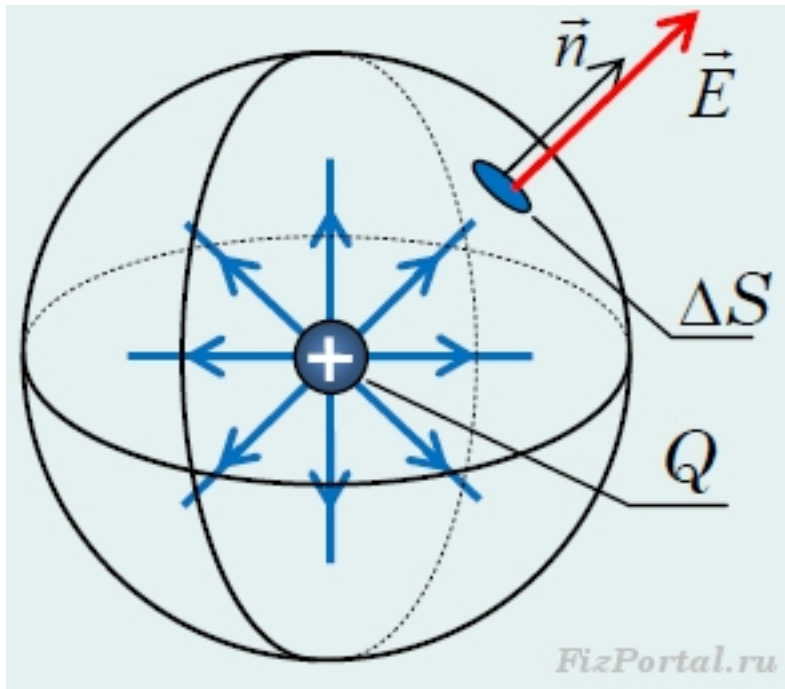
Потік напруженості електростатичного поля визначається як

$$\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E dS \cos \alpha = \oint_S E_n dS$$



$$\Delta\Phi = E\Delta S \cos \alpha = E_n\Delta S$$

Φ - поток вектора напряженности электрического поля.



$$dS' = r^2 d\Omega \quad (\text{тілесний кут у стерadianах})$$

$$\Phi = ES = 4\pi r^2 \frac{kQ}{r^2} = 4\pi kQ \quad dS = \frac{dS'}{\cos \alpha}$$

$$d\Phi = EdS \cos \alpha = \frac{kQ}{r^2} \frac{r^2 d\Omega}{\cos \alpha} \cos \alpha = kQ d\Omega$$

$$\Phi = \oint d\Phi = kQ \oint d\Omega = 4\pi kQ$$

Поле в тілесному куті $d\Omega$ виходить назовні на один раз більше, ніж входить всередину поверхні.

У кожному випадку для поля точкового заряду маємо

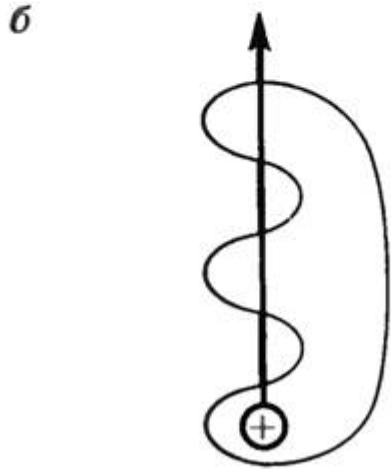
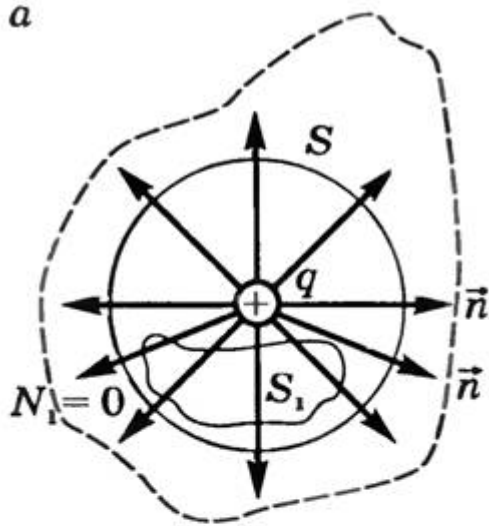
$$\Phi = 4\pi kQ$$

Для багатьох зарядів застосовуємо принцип суперпозиції

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i \text{ та отримуємо теорему Гауса-Остроградського}$$

$$\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = 4\pi kQ$$

Тут Q це повний заряд всередині замкненої поверхні.



Довільне електричне поле

$$\vec{E} = k \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{r_i^3} \vec{r}_i + k \int \frac{\rho dV}{r^3} \vec{r} + k \int \frac{\sigma dS}{r^3} \vec{r}$$

Електростатичне поле в симетричних конфігураціях

Центральна симетрія

В качестве первого примера определим поле симметрично заряженного шара. Поле такого шара направлено по его радиусам и зависит только от расстояния до центра шара. Отсюда легко вычислить поле вне шара. Определим для этого поток поля через сферическую поверхность радиуса r , центр которой совпадает с центром заряженного шара. Этот поток равен, очевидно, $4\pi r^2 E$. С другой стороны, по теореме Гаусса он равен $4\pi e$, где e — заряд шара. Поэтому $4\pi r^2 E = 4\pi e$, откуда

$$E = \frac{e}{r^2}. \quad E = k \frac{e}{r^2}$$

Таким образом, поле вне шара совпадает с полем точечного заряда, равного заряду шара и расположенного в центре шара.

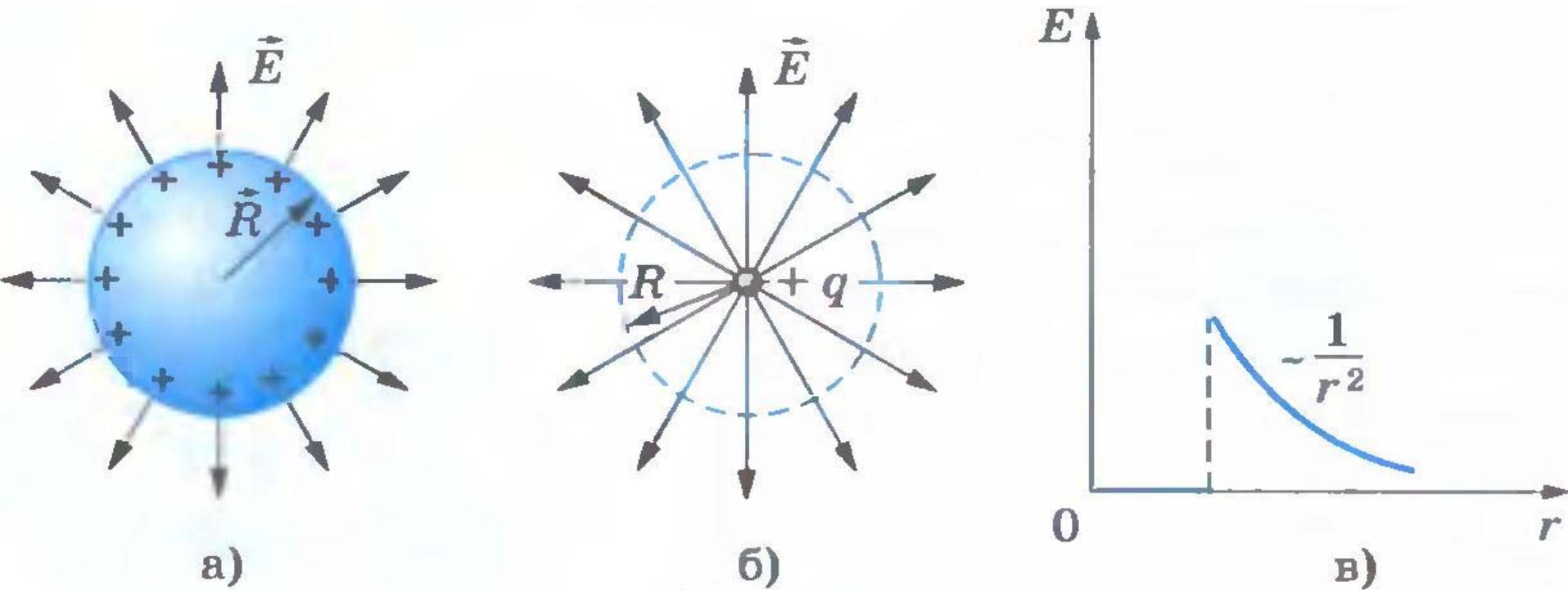


Рис. 14.14

З симетрії видно, що:
Поле спрямована вздовж радіуса.

$$E \equiv |\vec{E}| = E(r)$$

$$E = k \frac{Q(r)}{r^2}, \vec{E} = k \frac{Q(r)}{r^3} \vec{r}$$

Всередині полої зарядженої сферичної оболонки електростатичне поле відсутнє.

Саме це дозволяє перевірити показник у законі Кулона.

$$F \sim r^a, a = -2 \pm 10^{-7}$$

Поле внутри шара зависит от того, как расположены заряды в шаре. Если заряды расположены только на поверхности шара, то поле внутри шара будет равно нулю.

Если заряд распределен равномерно по объему шара с плотностью ρ (ρ представляет собой заряд единицы объема шара), то поле внутри шара может быть найдено с помощью теоремы Гаусса, примененной к сферической поверхности радиуса r , лежащей внутри шара:

$$E4\pi r^2 = 4\pi e_r,$$

где e_r — заряд, находящийся внутри сферической поверхности. Этот заряд равен произведению плотности заряда на объем сферы радиуса r , т. е. $e_r = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho$. Таким образом,

$$4\pi r^2 E = 4\pi \frac{4\pi}{3} r^3 \rho,$$

откуда

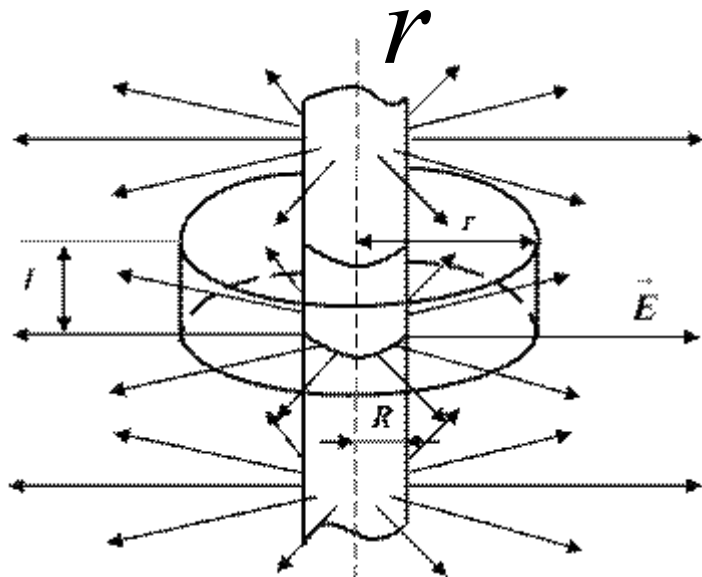
$$E = \frac{4\pi}{3} \rho r.$$

$$E \equiv |\vec{E}| = E(\rho)$$

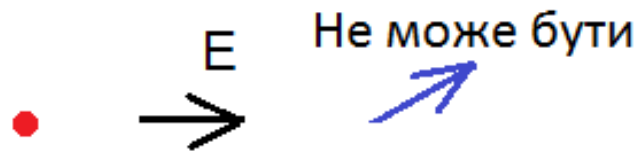
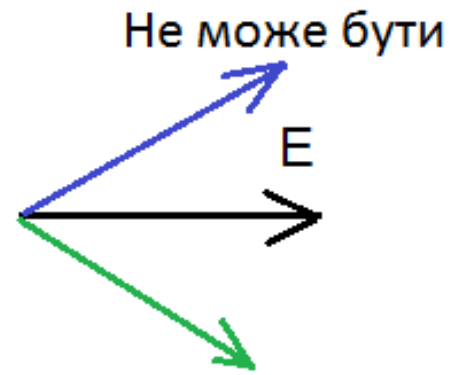
$$ES = \Phi = 4\pi kQ,$$

$$Q = l\lambda, \quad S = 2\pi r l,$$

$$E = \frac{2k\lambda}{r}$$



Нитка або циліндр



Всередині полої труби поля немає.

Нитка або циліндр

Мы видим, что поле внутри шара, равномерно заряженного по объему, пропорционально расстоянию от его центра, а вне шара — обратно пропорционально квадрату этого расстояния. На рис. 4 изображена зависимость поля такого шара от расстояния до центра (a обозначает радиус шара).

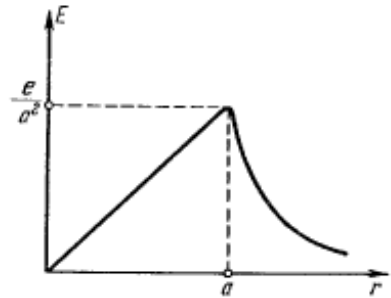


Рис. 4.

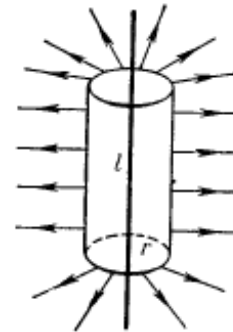


Рис. 5.

В качестве второго примера определим поле заряженной прямолинейной нити, вдоль которой заряды распределены равномерно. Предполагая длину нити достаточно большой, мы можем пренебречь влиянием ее концов, т. е. считать ее как бы бесконечно длинной. Из соображений симметрии ясно, что создаваемое такой нитью поле не может иметь составляющих в ту или другую сторону вдоль нити (поскольку обе эти стороны совершенно эквивалентны), т. е. должно быть направлено в каждой точке перпендикулярно нити. Пользуясь этим, легко определить поле нити. Рассмотрим для этого поток поля через поверхность цилиндра радиуса r и длины l с осью вдоль нити (рис. 5). Так как поле перпендикулярно оси, то поток через основания цилиндра будет равен нулю. Поэтому полный поток поля через рассматриваемую замкнутую поверхность сводится к потоку через боковую поверхность цилиндра. Он равен, очевидно, $E \cdot 2\pi r l$. С другой стороны, по теореме Гаусса он равен $4\pi e$, где e — заряд, находящийся на длине l нити; если обозначить через q заряд, приходящийся на единицу длины нити, то $e = ql$. Таким образом, имеем

$$2\pi r l E = 4\pi e = 4\pi q l,$$

откуда

$$E = \frac{2q}{r}.$$

Мы видим, что поле, создаваемое равномерно заряженной нитью, обратно пропорционально расстоянию r от нее.

Плосщина

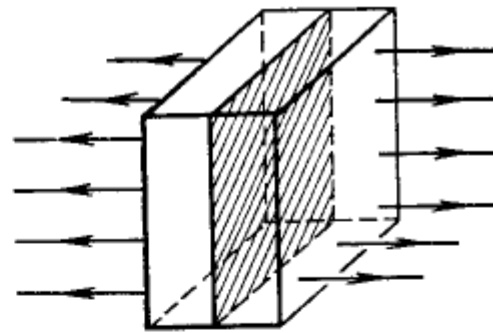


Рис. 6.

Найдем еще поле равномерно заряженной неограниченной плоскости. Из соображений симметрии очевидно, что поле будет направлено перпендикулярно плоскости и будет иметь одинаковые значения (но противоположные направления) на одинаковых расстояниях по обе стороны от нее.

Рассмотрим поток поля через замкнутую поверхность прямоугольного параллелепипеда (рис. 6), две грани которого параллельны заряженной плоскости, делящей параллелепипед пополам (на рисунке заштрихована часть этой плоскости, лежащая внутри параллелепипеда). Поток будет отличен от нуля только через эти грани. Поэтому согласно теореме Гаусса

$$2SE = 4\pi e = 4\pi S\sigma,$$

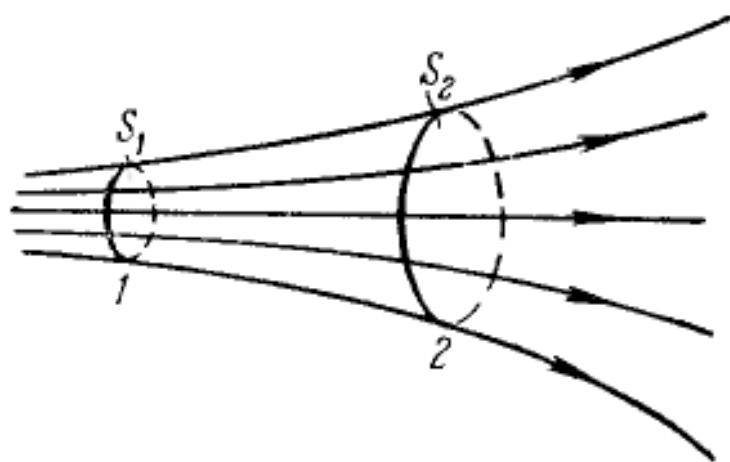
где S — площадь грани, а σ — заряд, приходящийся на единицу площади плоскости (поверхностная плотность заряда). Таким образом,

$$E = 2\pi\sigma. \quad E = 2\pi k\sigma$$

Мы видим, что поле бесконечной плоскости оказывается не зависящим от расстояния до этой плоскости. Другими словами, заряженная плоскость создает с каждой стороны от себя однородное электрическое поле.

Если внутри поверхности нет зарядов, или если сумма зарядов равна нулю, то поток электрического поля через эту поверхность равен нулю.

Рассмотрим узкий пучок силовых линий, ограниченный поверхностью, которая также образована силовыми линиями (рис. 3). Пересечем такой пучок или, как мы будем говорить, силовую трубку двумя эквипотенциальными поверхностями 1 и 2 и определим поток поля через замкнутую поверхность, образованную боковой поверхностью силовой трубки и эквипотенциальными поверхностями 1 и 2. Если внутри этой замкнутой поверхности нет зарядов, то общий поток через нее будет равен нулю. С другой стороны по-



ток через боковую поверхность трубки также, очевидно, равен нулю; поэтому потоки через поверхности 1 и 2 должны быть одинаковыми. Для наглядности наш пучок силовых линий можно уподобить струе жидкости.

Обозначим напряженности поля в сечениях 1 и 2 через E_1 и E_2 и площади самих сечений через S_1 и S_2 . В силу предположения об узости силовой трубки поля E_1 и E_2 можно считать постоянными вдоль каждого из сечений 1 и 2 . Поэтому мы можем записать равенство потоков через поверхности 1 и 2 в виде

$$S_1 E_1 = S_2 E_2$$

(так как поле перпендикулярно эквипотенциальной поверхности, то поток равен просто произведению напряженности поля на площадь поверхности). Так как число силовых линий N_1 , проходящих через сечение S_1 , равно числу силовых линий N_2 , проходящих через сечение S_2 , то можно написать

$$\frac{N_1}{S_1 E_1} = \frac{N_2}{S_2 E_2}.$$

Величины $n_1 = N_1/S_1$ и $n_2 = N_2/S_2$ представляют собой числа силовых линий, приходящихся на единицы площади поверхностей 1 и 2 , ортогональных силовым линиям. Мы видим, таким образом, что плотность или густота силовых линий пропорциональна напряженности поля:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{E_1}{E_2}.$$

Таким образом, графическое изображение поля с помощью силовых линий не только показывает направление поля, но и позволяет судить о его величине. Там, где силовые линии лежат гуще, напряженность электрического поля больше; где силовые линии разрежены, там поле слабее.