



Кафедра медицинской и биологической физики

Основы электростатики

Лекция №5 для студентов 1 курса, обучающихся по специальности – Стоматология

Д.ф.-м.н., зав.каф., Салмин Владимир Валерьевич

Цель: Изучение основ электростатики

План:

1. Элементарный электрический заряд
2. Электризация тел
3. Измерение заряда
4. Измерение взаимодействия зарядов
5. Закон Кулона
6. Электрическое поле, напряженность
7. Поле системы зарядов – принцип суперпозиции
8. Электрический диполь
9. Поле электрического диполя
10. Силовые линии электрического поля, мультиполя
11. Работа сил электростатического поля
12. Потенциал
13. Потенциал системы зарядов
14. Эквипотенциальные поверхности
15. *****

Элементарный электрический заряд

- Электрический заряд является неотъемлемым свойством элементарных частиц.

- Заряд всех элементарных частиц (если он не равен нулю) одинаков по абсолютной величине.

- Этот заряд принято называть элементарным зарядом и обозначать буквой e .

- Элементарный электрический заряд — фундаментальная физическая постоянная, минимальная порция (квант) электрического заряда.

- $e=1,602\ 176\ 6208(98) \cdot 10^{-19}$ Кл в Международной системе единиц (СИ)

масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
КВАРКИ	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	$0.511 \text{ МэВ}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
					КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ

Электризация тел

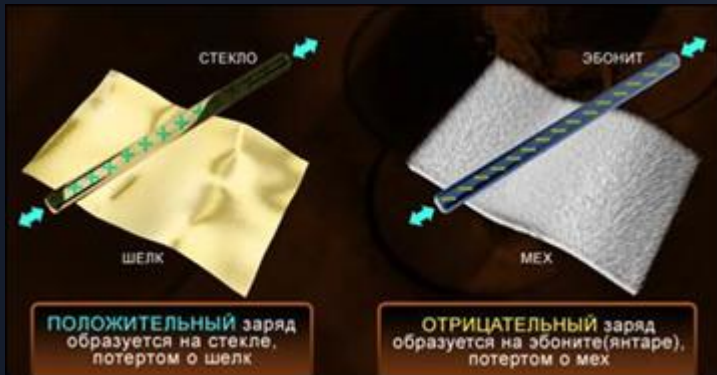
Суммарный заряд тела определяется суммой положительных и отрицательных зарядов частиц входящих в тело

$$Q = e(N_+ - N_-)$$

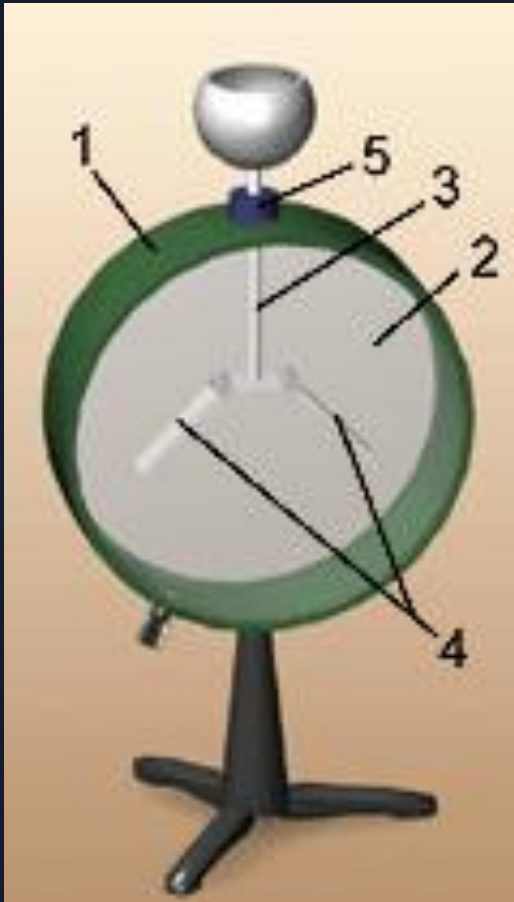
Поскольку все тела состоят из атомов а последние являются в обычных условиях электрически нейтральными то и тела в обычных условиях также электрически нейтральны. Условие электрической нейтральности

$$N_+ = N_-$$

При трении, ударе или простом соприкосновении электрическая нейтральность тела может нарушаться за счет прихода или ухода с тела электронов. Это электризация тела.



Измерение заряда



электроскоп



электрометр

Измерение взаимодействия зарядов

Закон, которому подчиняется сила взаимодействия так называемых точечных зарядов, был установлен в 1785 г. Кулоном.

Точечным зарядом называется заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от этого тела до других тел, несущих электрический заряд.

С помощью крутильных весов, подобных тем, которые были использованы Кавендишем для определения гравитационной постоянной. Кулон измерял силу взаимодействия двух заряженных шариков в зависимости от величины зарядов на них и от расстояния между ними. При этом Кулон исходил из того, что при касании к заряженному металлическому шарiku точно такого же незаряженного шарика заряд распределяется между обоими шариками поровну.



Закон Кулона

Кулон пришел к выводу, что *сила взаимодействия двух точечных зарядов пропорциональна величине каждого из зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*. Направление силы совпадает с проходящей через заряды прямой.

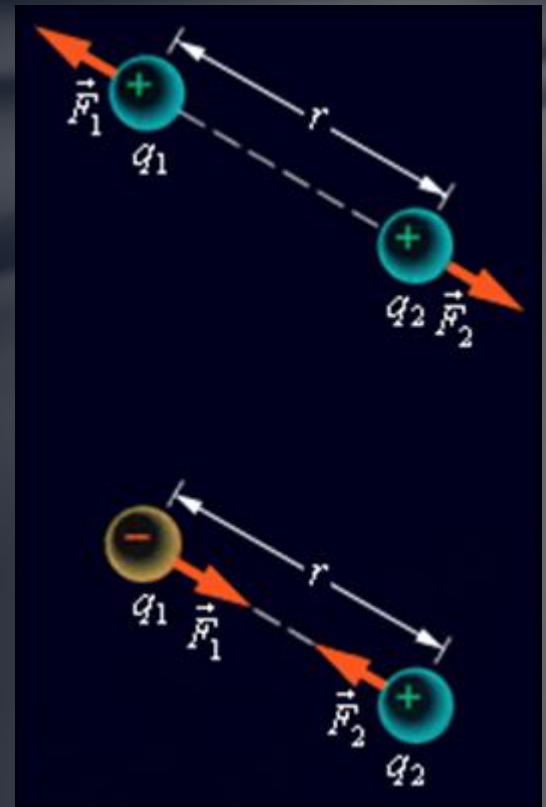
Закон Кулона может быть выражен следующей формулой

$$\vec{F}_{12} = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}, \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

$$\epsilon_0 \approx 8,85418781762 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$$

что для того, чтобы закон был верен, необходимы:

1. Точечность зарядов
2. Их неподвижность.
3. Расположение зарядов в вакууме.



Электрическое поле, напряженность

Всякий заряд изменяет свойства окружающего его пространства — создает в нем электрическое поле. Это поле проявляет себя в том, что помещенный в какую-либо его точку электрический заряд оказывается под действием силы.

Векторная величина **E** численно равна силе **f**, действующей на единичный точечный заряд, находящийся в данной точке поля называется напряженностью электрического поля в данной. Направление вектора **E** совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

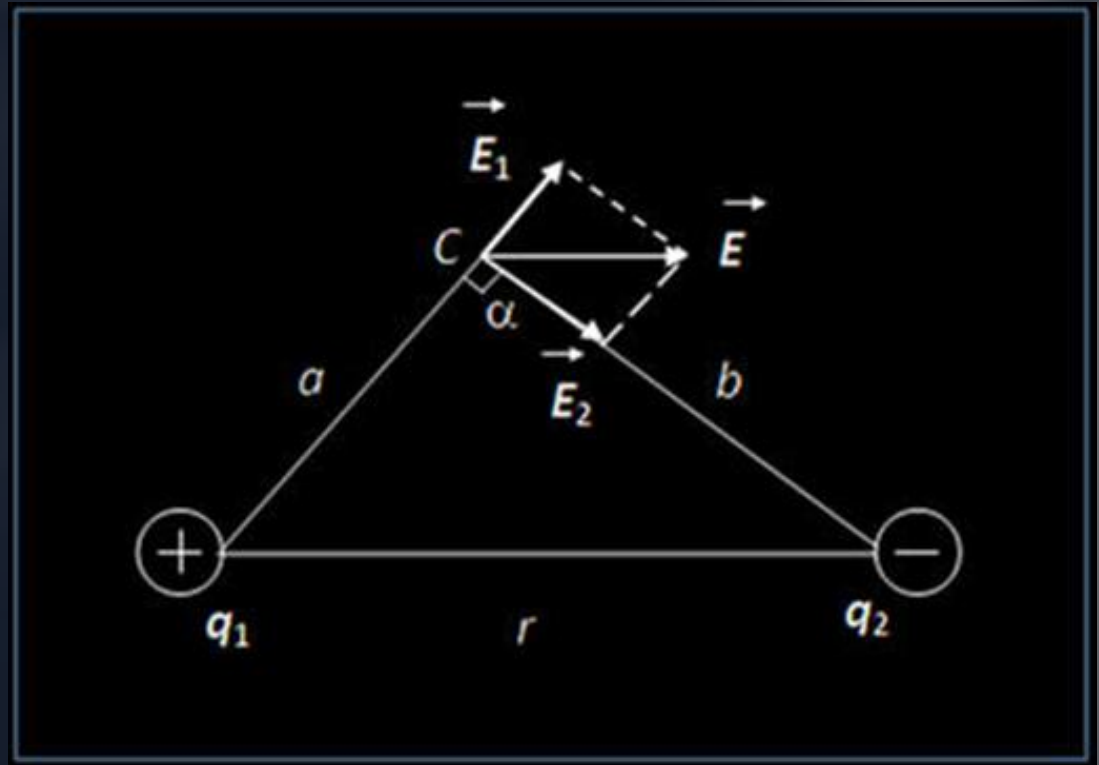
$$\vec{E}_{12} = \frac{\vec{F}_{12}}{q_2} = k \cdot \frac{q_1 \cdot \vec{r}_{12}}{r_{12}^2},$$

В СИ единица напряженности электрического поля имеет название вольт на метр и обозначается В/м

Поле системы зарядов – принцип суперпозиции

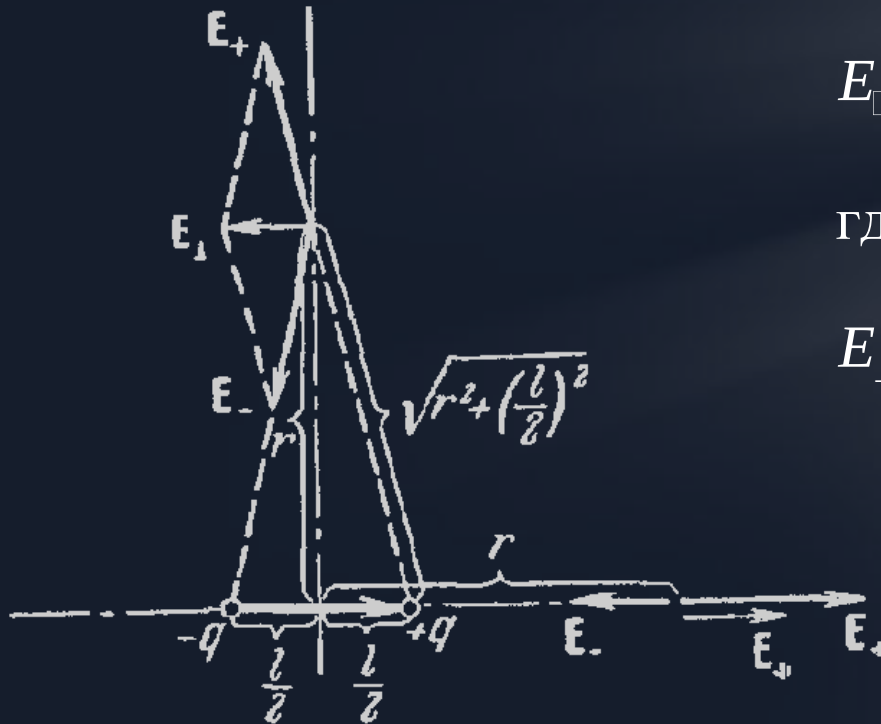
Опыт показывает, что сила, с которой система зарядов действует на некоторый не входящий в систему заряд в вакууме, равна векторной сумме сил, с которыми действует на данный заряд каждый из зарядов системы в отдельности. Отсюда вытекает, что напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности:

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



Электрический диполь

Электрическим диполем называется система двух одинаковых по величине разноименных точечных зарядов: $+q$ и $-q$, расстояние между которыми l значительно меньше, чем расстояние до тех точек, в которых определяется поле системы. Прямая, проходящая через оба заряда, называется **осью диполя**.



$$E_{\parallel} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3};$$

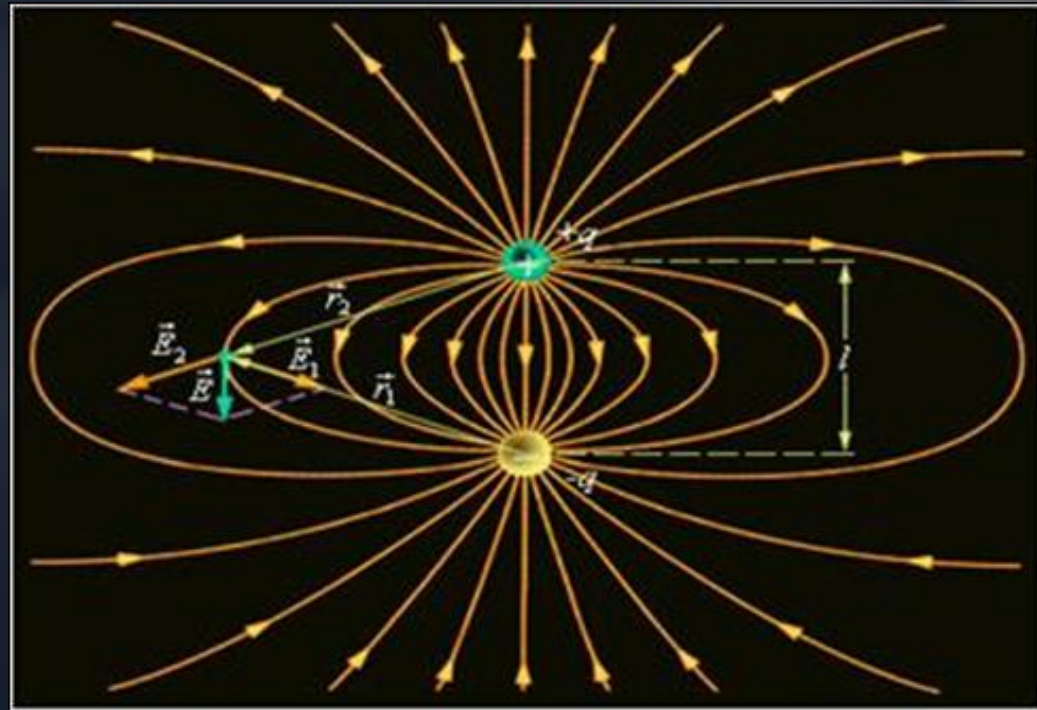
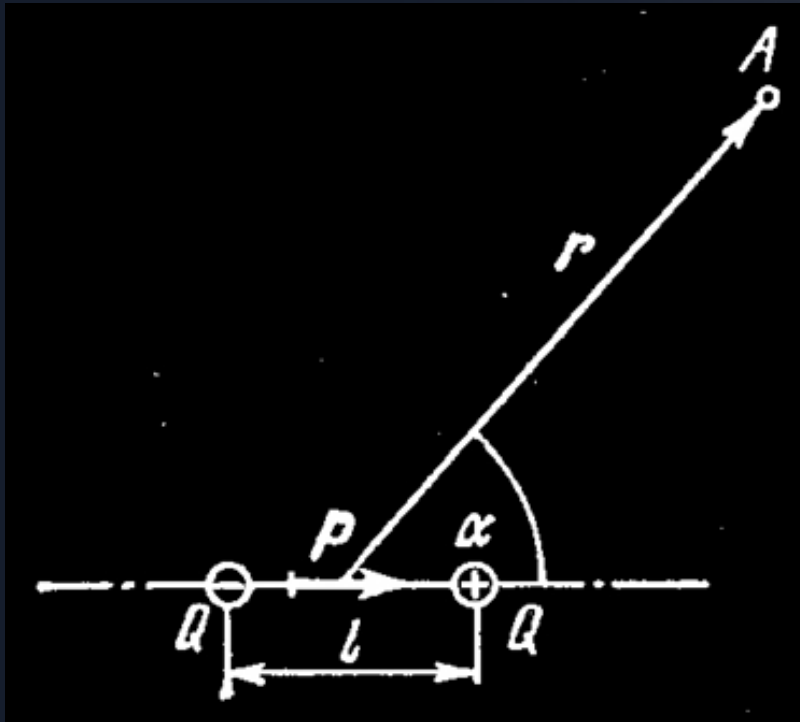
где p электрический момент диполя

$$E_{\perp} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}$$

Поле электрического диполя

Напряженность поля электрического диполя в произвольной точке пространства задается выражением

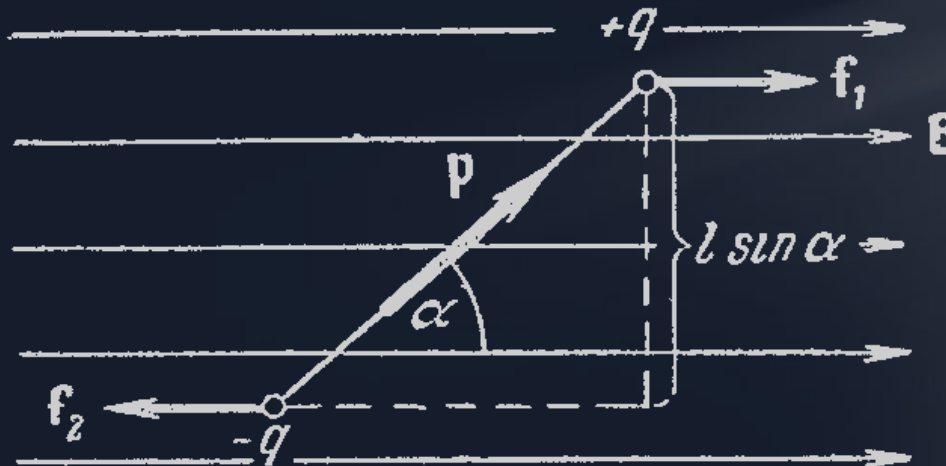
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2 \alpha}$$



Диполь в однородном электрическом поле

Если диполь поместить в однородное электрическое поле, образующие диполь заряды $+q$ и $-q$ окажутся под действием равных по величине, но противоположных по направлению сил f_1 и f_2 . Эти силы образуют пару, плечо которой равно зависит от ориентации диполя относительно поля. Модуль каждой из сил равен qE . Умножив его на плечо, получим величину момента пары сил, действующих на диполь:

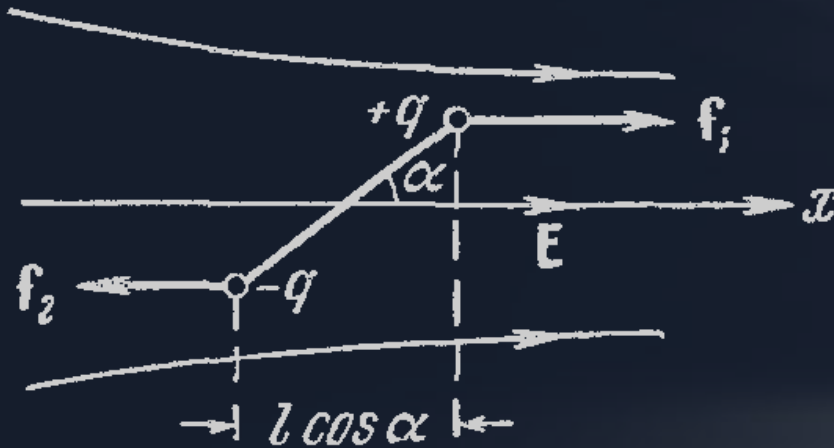
Момент стремится повернуть диполь так, чтобы его момент p установился по направлению поля.



$$M = qEl \sin \alpha = pE \sin \alpha$$

$$\vec{M} = [\vec{p} \vec{E}]$$

Диполь в неоднородном электрическом поле



В неоднородном поле силы, действующие на заряды диполя, не одинаковы по величине. Напряженность поля в точках, где помещаются заряды, отличается на

$$\Delta E = \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x = \frac{\partial E}{\partial x} l \cos \alpha$$

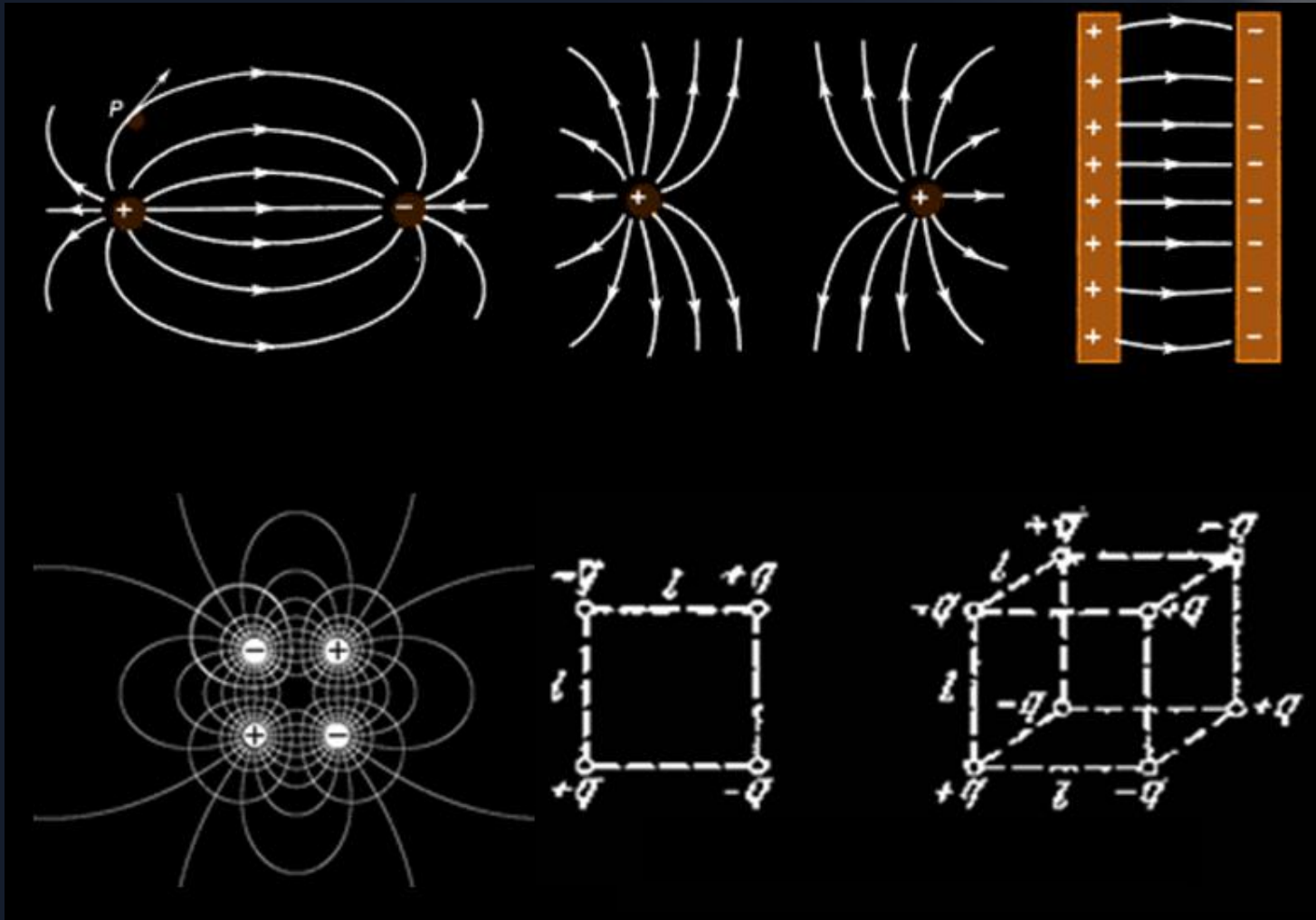
Проекция этой результирующей на ось x силы, равна

$$f = q \Delta E = q \frac{\partial E}{\partial x} l \cos \alpha = p \frac{\partial E}{\partial x} \cos \alpha$$

В неоднородном поле на диполь кроме вращательного момента действует сила из-за которой диполь будет втягиваться в область более сильного поля

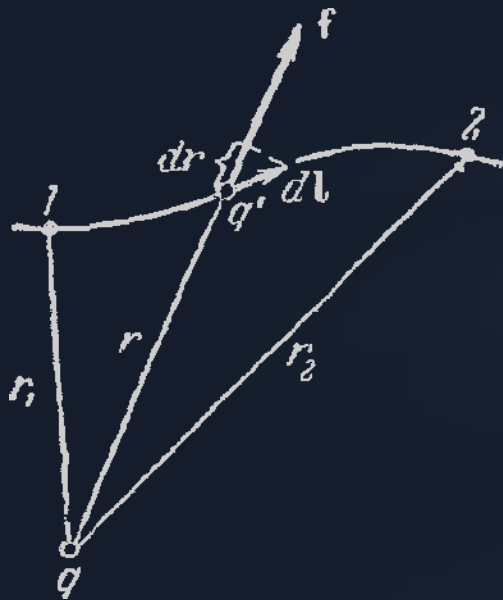
Силовые линии электрического поля, мультиполя

Электрическое поле можно задать, указав для каждой точки величину и направление вектора E . Совокупность этих векторов образует поле вектора напряженности электрического поля



Работа сил электростатического поля

Вычислим работу, которая совершается силами поля неподвижного точечного заряда q над перемещающимся в этом поле точечным зарядом q' . Работа на элементарном пути dl равна



$$dA = f dl \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} dl \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} dr$$

Работа на всем пути равна

$$A_{12} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{qq'}{r_1} - \frac{qq'}{r_2} \right)$$

Работа не зависит от пути, по которому перемещался в электрическом поле заряд, а зависит лишь от начального и конечного положений этого заряда. Следовательно, силы, действующие на заряд q' в поле неподвижного заряда q , являются **потенциальными**. Из механики известно, что работа потенциальных сил на замкнутом пути равна нулю

Потенциал

Тело, находящееся в потенциальном поле сил, обладает потенциальной энергией, за счет которой совершается работа силами поля. работа может быть представлена как разность значений потенциальной энергии, которыми обладал заряд q' в точках 1 и 2 поля заряда q

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r_2} = W_1 - W_2$$

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r} - \text{потенциальная энергия системы 2 - х зарядов}$$

Потенциалом поля в данной точке называется величина численно равная потенциальной энергии, которой обладает в данной точке поля единичный положительный заряд.

$$\varphi = \frac{W}{q'} [\text{Вольт}]$$

Для точечного заряда в вакууме потенциал равен $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$

Работа по перемещению заряда в потенциальном поле $A_{12} = W_1 - W_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2)$

Потенциал системы зарядов

Потенциал поля, создаваемого системой зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов в отдельности

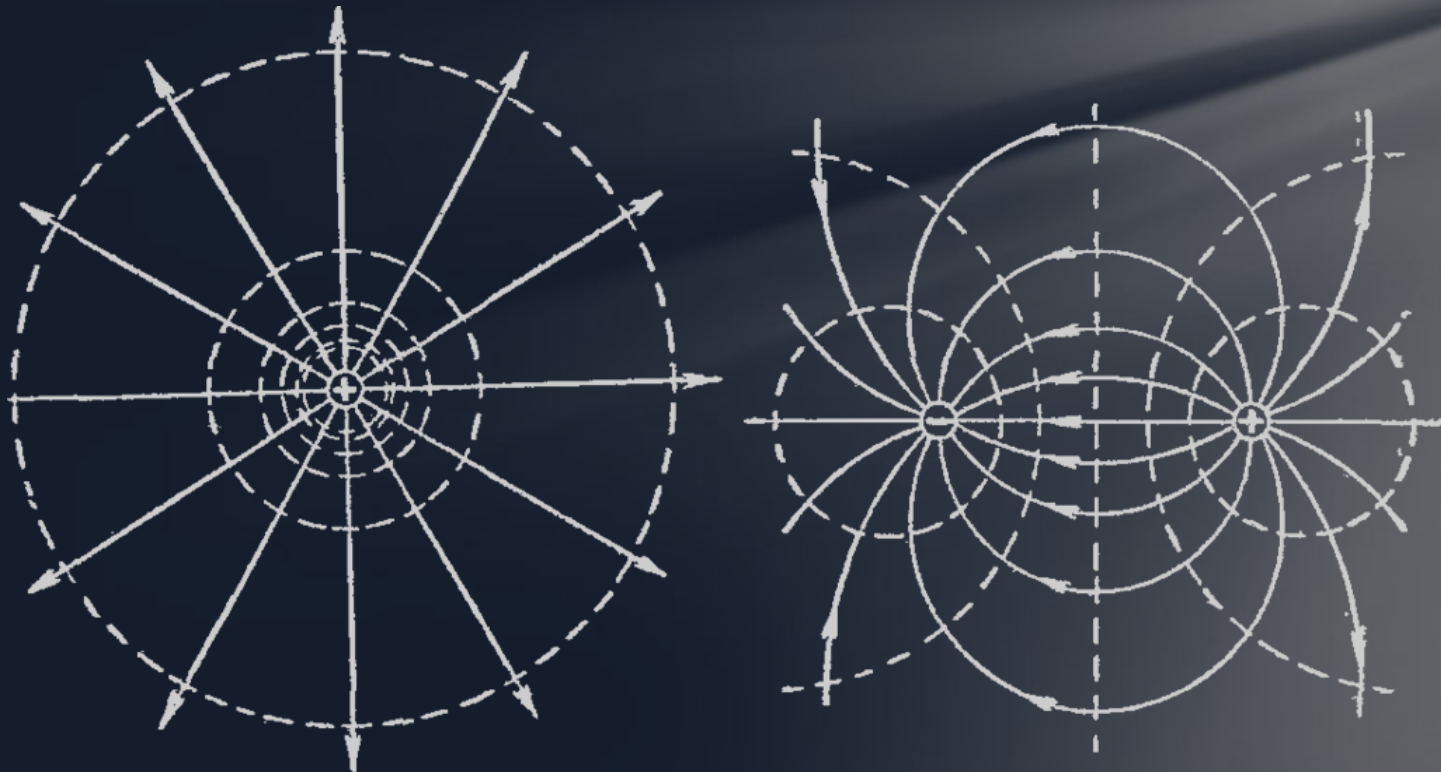
$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i q}{r_i}; \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i}{r_i}$$

Эквипотенциальные поверхности

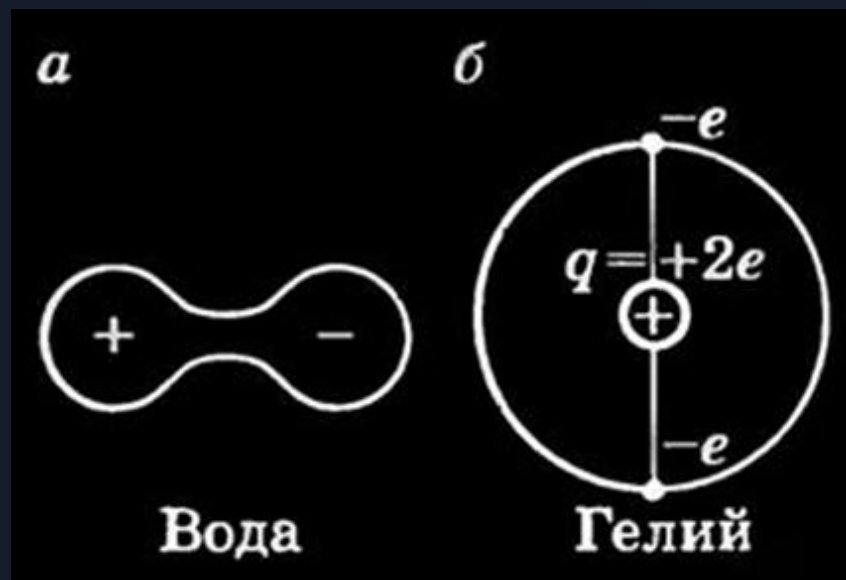
Эквипотенциальная поверхность — это такая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал. Если потенциал задан как функция от x , y и z , уравнение эквипотенциальной поверхности имеет вид

$$\varphi(x, y, z) = \text{const}$$

В каждой точке поля эквипотенциальная поверхность и силовая линия проходящая через выбранную точку перпендикулярны друг другу



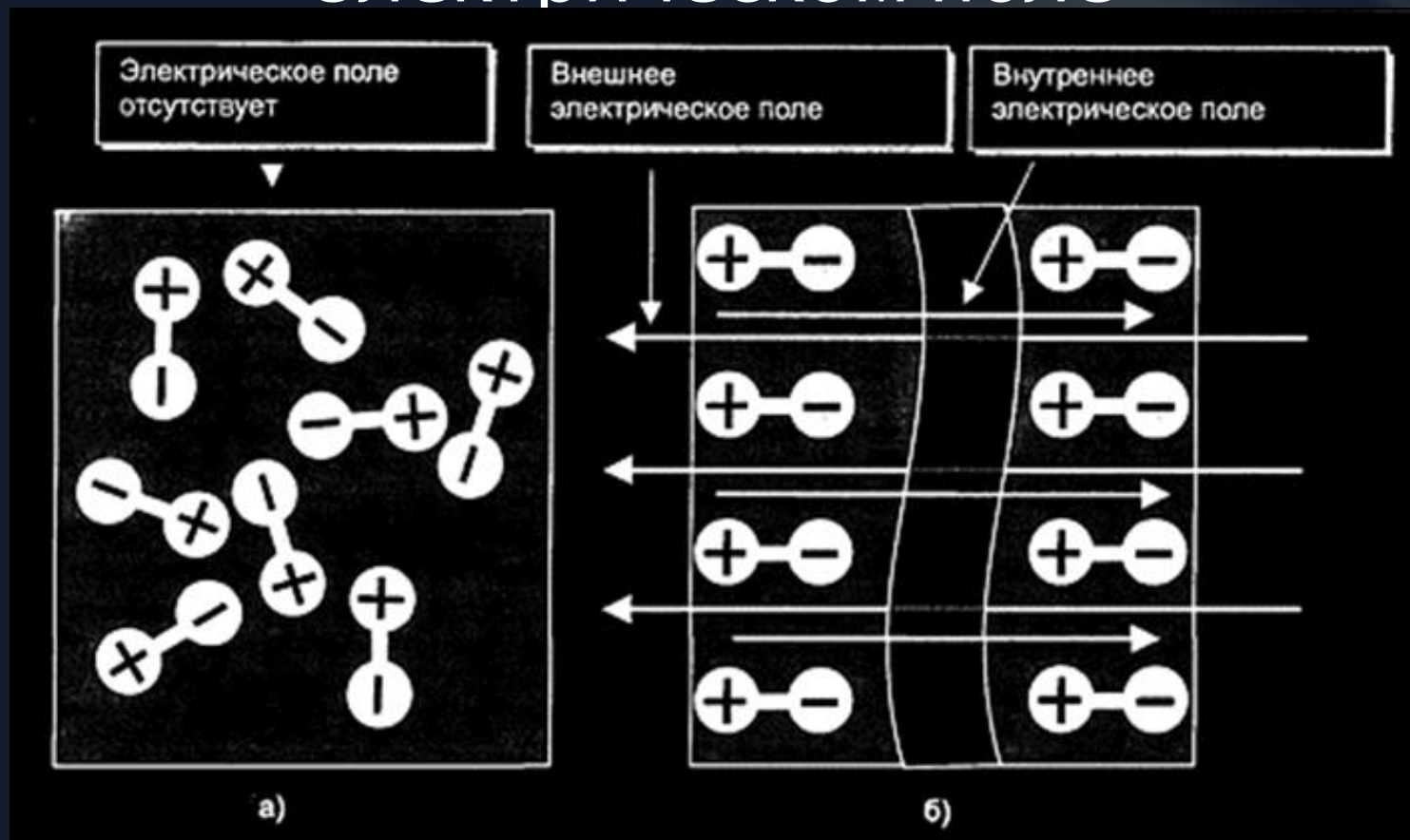
Полярные и неполярные диэлектрики



А) Полярные диэлектрики состоят из молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают (спирт, вода и др.). В качестве модели молекулы полярного диэлектрика используются электрические диполи. Тепловое движение молекул приводит к хаотической ориентации диполей. Из-за этого на поверхности диэлектрика, а также и в любом его объеме, содержащем большое число молекул электрический заряд в среднем равен нулю.

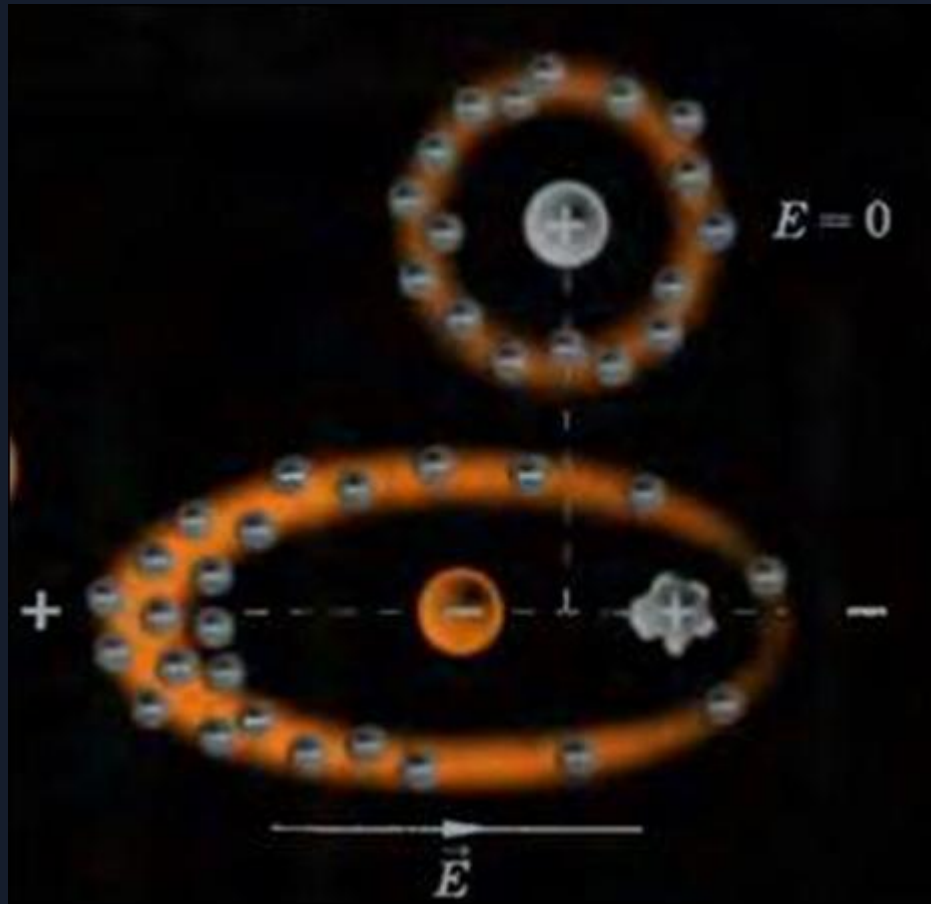
Б) Неполярные диэлектрики состоят из атомов и молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают (инертные газы, кислород, бензол, водород и др.).

Полярная молекула во внешнем электрическом поле



Действие внешнего поля на полярную молекулу сводится в основном к стремлению повернуть молекулу так, чтобы ее электрический момент установился по направлению поля. На величину электрического момента внешнее поле практически не влияет. Полярная молекула ведет себя во внешнем поле как жесткий диполь.

Неполярная молекула во внешнем электрическом поле. Поляризуемость молекулы



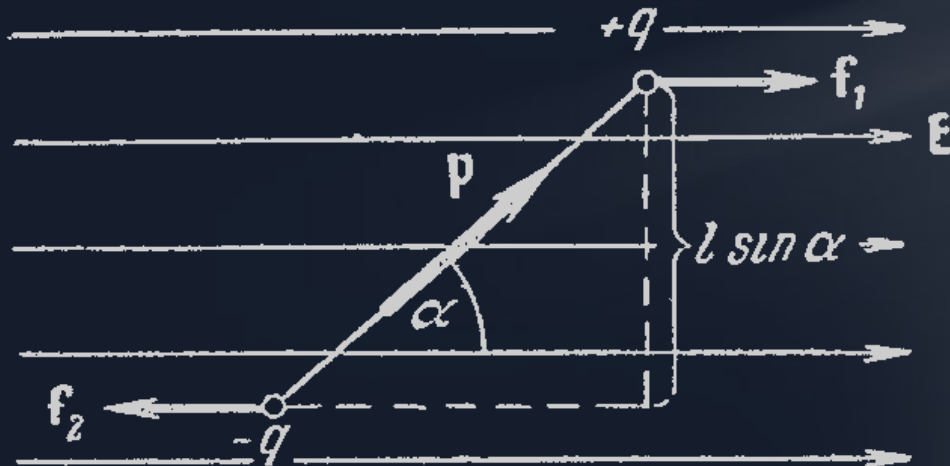
Под действием внешнего электрического поля заряды в неполярной молекуле смещаются друг относительно друга: положительные по направлению поля, отрицательные против поля. В результате молекула приобретает электрический момент, величина которого, пропорциональна напряженности поля. Во внешнем поле молекула ведет себя как упругий диполь

$$\vec{p} = \beta \epsilon_0 \vec{E} \quad \beta - \text{поляризуемость молекулы [м}^3\text{]}$$

Диполь в однородном электрическом поле

Если диполь поместить в однородное электрическое поле, образующие диполь заряды $+q$ и $-q$ окажутся под действием равных по величине, но противоположных по направлению сил f_1 и f_2 . Эти силы образуют пару, плечо которой равно зависит от ориентации диполя относительно поля. Модуль каждой из сил равен qE . Умножив его на плечо, получим величину момента пары сил, действующих на диполь:

Момент стремится повернуть диполь так, чтобы его момент p установился по направлению поля.



$$M = qEl \sin \alpha = pE \sin \alpha$$

$$\vec{M} = [\vec{p} \vec{E}]$$

Работа на поворот диполя

Чтобы увеличить угол между векторами $\mathbf{p}$ и $\mathbf{E}$ на $d\alpha$, нужно совершить против сил, действующих на диполь в электрическом поле, работу

$$dA = Md\alpha = pE \sin \alpha d\alpha$$

Эта работа идет на увеличение потенциальной энергии W , которой обладает диполь в электрическом поле

$$dW = pE \sin \alpha d\alpha$$

Интегрирование выражения дает для энергии диполя в электрическом поле выражение

$$W = \int pE \sin \alpha d\alpha = pE \cos \alpha + const$$

Наконец, полагая $const$ равной нулю, получаем

$$W = -pE \cos \alpha = -\vec{p} \vec{E}$$

Поляризация диэлектриков

В отсутствие внешнего электрического поля дипольные моменты молекул диэлектрика или равны нулю (неполярные молекулы), или распределены по направлениям в пространстве хаотическим образом (полярные молекулы). В обоих случаях суммарный электрический момент диэлектрика равен нулю. Под действием внешнего поля диэлектрик поляризуется. Это означает, что результирующий электрический момент диэлектрика становится отличным от нуля.

Поляризацию диэлектриков характеризует вектор электрической поляризации. Физический смысл вектора электрической поляризации — это дипольный момент, отнесенный к единице объема диэлектрика. Иногда вектор поляризации коротко называют просто поляризацией.

$$\bar{P} = \frac{\sum_i \bar{p}_i}{\Delta V} [Кл / м^2]$$

Диэлектрическая восприимчивость

У диэлектриков любого типа (кроме сегнетоэлектриков), вектор поляризации связан с напряженностью поля в той же точке простым соотношением

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E},$$

где ε_0 — электрическая постоянная;

$\varepsilon_0 \chi_e$ называется в системе СИ *абсолютной диэлектрической восприимчивостью*.

В случае вакуума

$$\chi_e = 0.$$

У диэлектриков как правило, диэлектрическая восприимчивость положительна. Диэлектрическая восприимчивость является безразмерной величиной.

Электрическое смещение (электрическая индукция)

Электр́ическая индúкция (электр́ическое смещéние) — векторная величина, равная сумме вектора напряжённости электрического поля и вектора поляризации.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \chi \varepsilon_0 \mathbf{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \mathbf{E} \text{ [Кл / м}^2\text{]}$$

Безразмерная величина $\varepsilon = 1 + \chi$

называют относительной диэлектрической проницаемостью или просто диэлектрической проницаемостью среды

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$$

Поле внутри диэлектрика



Под напряженностью поля в диэлектрике понимают значение E , получающееся усреднением истинного поля по физически бесконечно малому объему. Макроскопическое поле E получается в результате наложения двух полей: поля, создаваемого **свободными зарядами**, т. е. такими зарядами, которые могут передаваться от одного тела к другому при их касании $E_0 = \sigma / \epsilon_0$, и поля **связанных зарядов** $E' = \sigma' / \epsilon_0$. Оба поля направлены навстречу друг другу

$$E = E_0 - E' = E_0 - \chi E$$

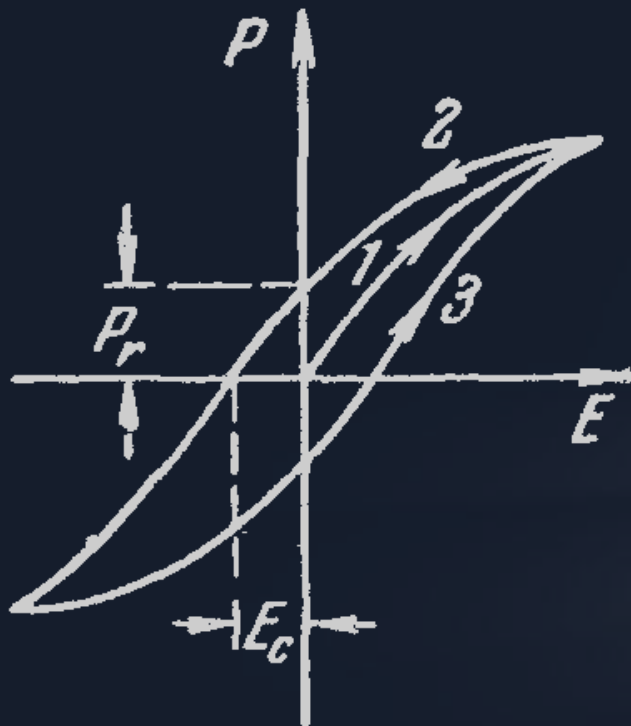
$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\epsilon}$$

Относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз ослабляется поле за счет диэлектрика.

Значения диэлектрической проницаемости для некоторых веществ

Вещество	Химическая формула	Условия измерения	Характерное значение ϵ_r
<u>Вакуум</u>	-	-	1
<u>Воздух</u>	-	<u>Нормальные условия,</u> 0,9 МГц	$1,00058986 \pm$ 0,00000050
<u>Тефлон</u>	$[-CF_2-CF_2-]_n$	-	2,1
<u>Полиэтилен</u>	$[-CH_2-CH_2-]_n$	-	2,25
<u>Полистирол</u>	$[-CH_2-C(C_6H_5)H-]_n$	-	2,4-2,7
<u>Бумага</u>	-	-	2,0-3,5
<u>Плексиглас</u> <u>(оргстекло)</u>	-	-	3,5
<u>Кварц</u>	SiO_2	-	3,5-4,5
<u>Фарфор</u>	—	—	4,5-4,7
<u>Стекло</u>	—	—	4,7 (3,7-10)
<u>Керамика</u>	—	—	10-20
<u>Спирт этиловый</u>	C_2H_5OH или CH_3- CH_2-OH	—	27
<u>Вода</u>	H_2O	0 °C	88
<u>Двуокись титана</u>	TiO_2	-	86-173
<u>Титанат бария</u>	$BaTiO_3$	(20-120 °C)	1250-10000

Сегнетоэлектрики



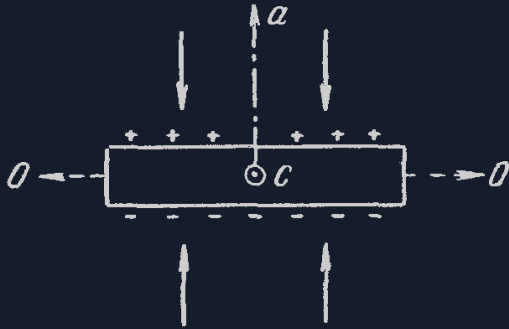
Существует группа веществ, которые могут обладать спонтанной (самопроизвольной) поляризацией в отсутствие внешнего поля.. Это явление было открыто первоначально для сегнетовой соли, в связи с чем все подобные вещества получили название сегнетоэлектриков

Свойства

1. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков бывает порядка нескольких тысяч.
2. Зависимость D от E не является линейной, следовательно, диэлектрическая проницаемость оказывается зависящей от напряженности поля
3. При изменениях поля значения вектора поляризации P отстают от напряженности поля E , Это явление называется **гистерезисом**
4. При обращении E в нуль вещество сохраняет значение поляризации, называемое **остаточной поляризацией**.
5. Для каждого сегнетоэлектрика имеется температура, выше которой вещество утрачивает необычные свойства и становится нормальным диэлектриком. Эта температура называется точкой Кюри.



Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект



Некоторые кристаллы, не имеющие центра симметрии (в том числе все сегнетоэлектрики), при деформации поляризуются. Это явление называется **прямым пьезоэлектрическим эффектом**. Величина поляризации пропорциональна деформации, а следовательно, в пределах упругости и механическому напряжению. При изменении знака деформации знак поляризации меняется также на обратный. Важнейшими пьезоэлектриками (т. е. пьезоэлектрическими кристаллами) являются кварц, сегнетова соль, метатитанат бария и др.

У пьезоэлектрических кристаллов наблюдается **обратный эффект**, заключающийся в том, что поляризация под действием электрического поля сопровождается механическими деформациями кристалла:

Равновесие зарядов на проводнике

Носители заряда в проводнике способны перемещаться под действием сколь угодно малой силы !!! (нет сухого трения - электрическая жидкость).

Условия равновесия зарядов в проводнике

1. Напряженность поля всюду внутри проводника должна быть равна нулю

$$E=0$$

Что соответствует тому, что потенциал внутри проводника должен быть постоянным

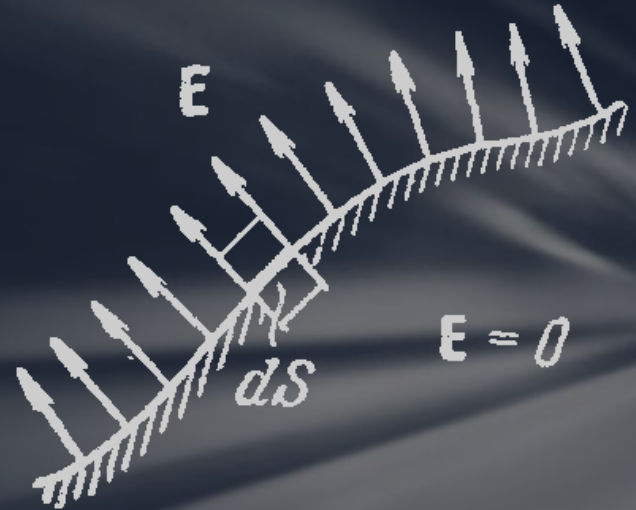
$$\varphi = \text{const}$$

2. Напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности

$$E = E_n$$

Следовательно, в случае равновесия зарядов поверхность проводника будет

эквипотенциальной.

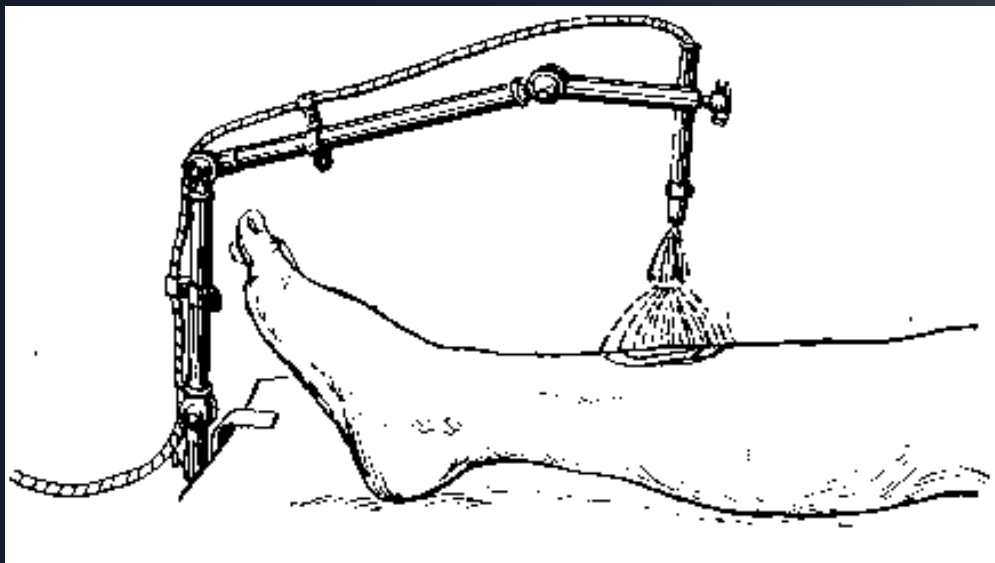
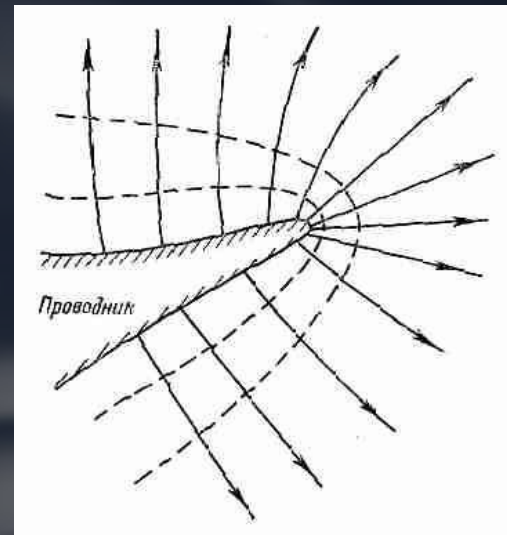


Заряженный проводник

Если проводящему телу сообщить некоторый заряд q , то он распределится так, чтобы соблюдались условия равновесия.

При равновесии ни в каком месте внутри проводника не может быть избыточных зарядов — все они расположатся по поверхности проводника с некоторой плотностью σ

Избыточный заряд распределяется на полом проводнике так же, как и на сплошном, т. е. по его наружной поверхности.



Франклинизация

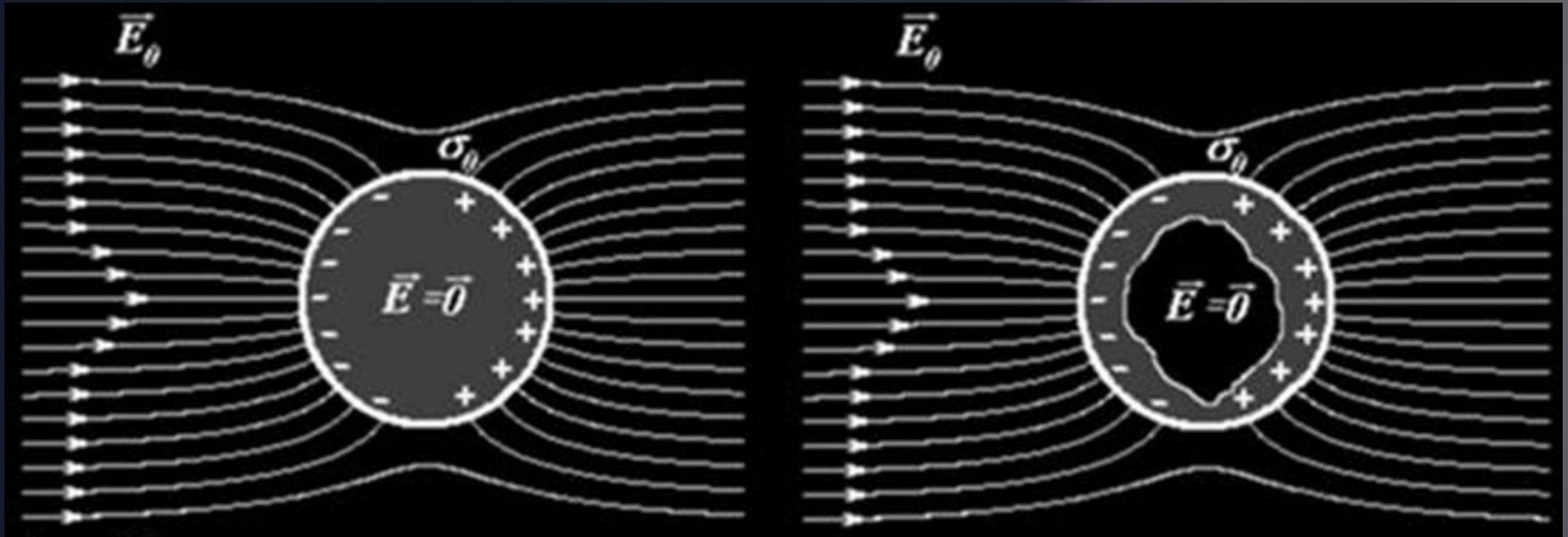


Электрический душ

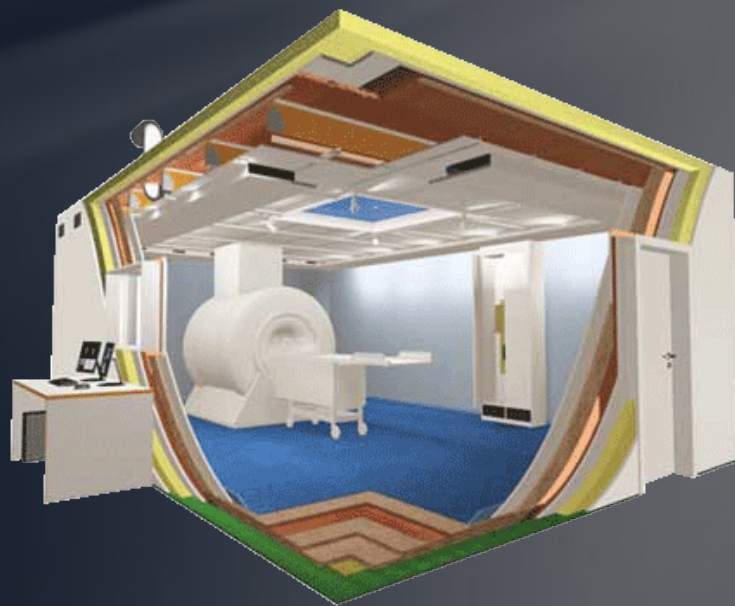
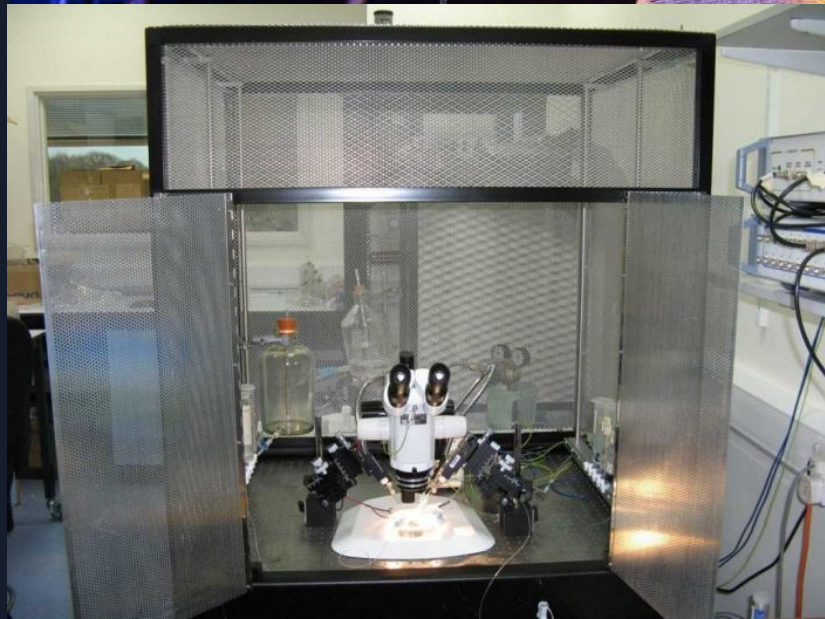
Проводники во внешнем электрическом поле

При внесении незаряженного проводника в электрическое поле носители заряда приходят в движение: положительные в направлении вектора $\vec{E}$, отрицательные — в противоположную сторону. В результате у концов проводника возникают заряды противоположного знака, называемые **индуцированными зарядами**.

Поле этих зарядов направлено противоположно внешнему полю. Таким образом, накапливание зарядов у концов проводника приводит к ослаблению в нем поля. Перераспределение носителей заряда происходит до тех пор, пока не будут выполнены условия равновесия зарядов.



Электростатическая защита, клетка Фарадея



Електроємність

Потенціал уєдиненого провідника пропорціонален находящомуся на нем заряду. Збільшення в некоторое число раз заряду приводить к збільшенню в то же число раз напруженности поля в кожній точці оточуючого провідник пространства. Следовательно, в такое же число раз зростатиме робота переносу по любому пути єдиного заряду из бесконечности на поверхность провідника, т. є. потенціал провідника.

$$\varphi = Cq$$

Коєфіцієнт пропорціональності C между потенціалом и зарядом називається **ємністю**. Єдиниця измерения ємкости – **Фарад = Кулон/Вольт**

Ємкость уєдиненої сфери $C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$. Ємкость 1 Фарад будет у сфери $R = 10^{10}$ м т.є. в 15 раз більше радіуса Сонця

Основні єдиниці измерения електрической ємкости

Микрофарад = 10^{-6} Ф

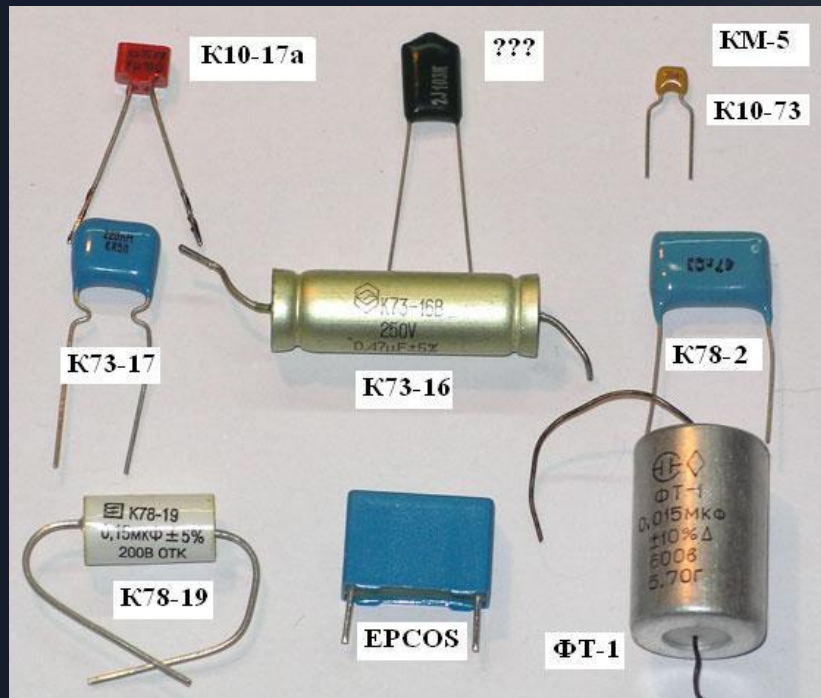
Нанофарад = 10^{-9} Ф

Пикофарад = 10^{-12} Ф *Соответствует радиусу сфери 1 см*

Конденсатор

Уединенные проводники обладают малой емкостью. Вместе с тем, на практике бывает потребность в устройствах, которые при небольшом относительно окружающих тел потенциале накапливали бы на себе («конденсировали») заметные по величине заряды. В основу таких устройств, называемых **конденсаторами**, положен тот факт, что электроемкость проводника возрастает при приближении к нему других тел. Самый простой конденсатор образуется при приближении друг к другу двух проводящих пластин (обкладок) на некоторое расстояние d . Емкость такого конденсатора вычисляется по формуле

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

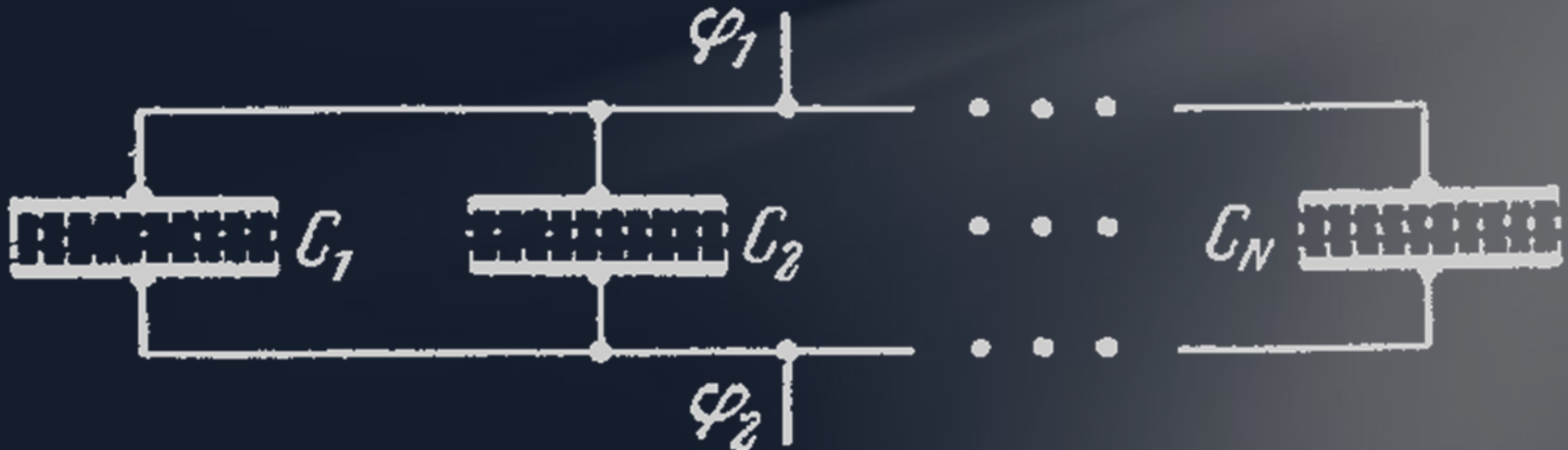


Соединение конденсаторов: параллельное

Располагая некоторым набором конденсаторов, можно значительно расширить число возможных значений емкости и рабочего напряжения, если применить соединение конденсаторов в батареи.

При **параллельном соединении** одна из обкладок каждого конденсатора имеет потенциал φ_1 , а другая φ_2 . Следовательно, на каждой из двух систем обкладок накапливается суммарный заряд

$$q = \sum q_k = \sum C_k (\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2) \sum C_k. \quad C = \sum C_k.$$



Соединение конденсаторов: последовательное

Для конденсаторов, включенных последовательно, характерна одинаковая величина заряда q на обкладках. Поэтому напряжение на каждом из конденсаторов

$$U_k = \frac{q}{C_k}.$$

Сумма этих напряжений равна разности потенциалов, приложенной к батарее:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \sum U_k = \sum \frac{q}{C_k} = q \sum \frac{1}{C_k},$$

$$\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_k}.$$

При последовательном соединении конденсаторов складываются величины, обратные их емкостям.



Энергия заряженного конденсатора

Процесс возникновения на обкладках конденсатора зарядов $+q$ и $-q$ можно представить так, что от одной обкладки последовательно отнимаются очень малые порции заряда Δq и перемещаются на другую обкладку. Работа переноса очередной порции равна

$$\Delta A = \Delta q (\varphi_1 - \varphi_2) = \Delta q U,$$
$$dW = dA = U dq = \frac{q}{C} dq.$$

Интегрируем последнее уравнение

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

Дефибриллятор



Рис. 28. Схема импульсного дефибриллятора

Контрольные вопросы

1. Чему равен элементарный заряд
2. Какой эффект используется для получения ультразвука
3. В каких единицах измеряется емкость

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА:

Обязательная:

1. Курс общей физики. В 4 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: Савельев И.В., М.: КноРус, 2012
2. Медицинская и биологическая физика: учебник., Ремизов А.Н. [и др.], М.: Дрофа, 2010
3. Курс физики : учебное пособие Трофимова, Т. И., М.: Академия, 2010

Дополнительная:

1. Краткий курс медицинской и биологической физики с элементами реабилитологии. Лекции и семинары: учебное пособие. Федорова В.Н., Степанова Л.А. М.: Физмат-лит, 2005
2. Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике для самостоятельной работы студентов Барцева О.Д. [и др.] Красноярск: Литера-принт, 2009