

# Физические основы систем связи

Рабчевский Андрей Николаевич  
Старший преподаватель кафедры ИБиСС  
E-mail: [andrey@ranat.ru](mailto:andrey@ranat.ru), +7 (912) 7808729

# Список литературы

- Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 2. Электричество и магнетизм. ISBN - 978-5-8114-1208-2. Издательство «Лань». 2021 г.
- Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 4. Волны. Оптика. ISBN - 978-5-8114-1210-5. Издательство «Лань». 2021 г.
- Иродов, И. Е. Задачи по общей физике : учебное пособие для вузов / И. Е. Иродов. — 18-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 420 с. — ISBN 978-5-8114-6779-2.
- Перминов, А. В. Общая физика. Задачи с решениями : задачник / А. В. Перминов, Ю. А. Барков. — Саратов : Вузовское образование, 2020. — 725 с. — ISBN 978-5-4487-0603-5. DOI: <https://doi.org/10.23682/95156>

# Лекция 1. Основные темы

- Электрический заряд
- Закон Кулона
- Электрическое поле
- Напряженность электрического поля
- Потенциал электрического поля

# Электрический заряд

- Все тела в природе способны электризоваться, т.е. приобретать электрический заряд.
- Существуют положительные и отрицательные заряды.
- Заряженные тела взаимодействуют друг с другом.
- Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.
- Электрический заряд это свойство некоторых элементарных частиц. Их заряд одинаков по абсолютной величине и является наименьшим в природе. Это элементарный заряд.
- Положительный элементарный заряд  $+e$ , отрицательный  $-e$ .
- Электрон имеет заряд  $-e$ , протон  $+e$ , нейтрон  $=0$ .
- Эти частицы входят в состав атомов, из которых состоит любое вещество, это и объясняет способность вещества электризоваться.

# Электрический заряд

- Количество электронов и протонов - равное количество
- Распределены равномерно
- Алгебраическая сумма зарядов равна 0.
- Можно создать избыток частиц одного знака (недостаток другого)
- Можно перераспределить частицы внутри тела
- Всякий заряд это совокупность элементарных зарядов

$$q = \pm Ne$$

- Из этой формулы следует, что электрический заряд квантуется.
- Элементарный заряд очень мал, поэтому можно считать, что макрозаряды изменяются непрерывно.

# Электрический заряд

- Величина заряда не зависит от скорости его движения.
- Заряды могут исчезать и возникать вновь. Всегда парами.
- Электрон и позитрон при встрече аннигилируют, т.е. превращаются в нейтральные гамма-фотоны.
- Гамма-фотон, попадая в поле атомного ядра порождает пару электрон и позитрон. При этом возникают заряды  $+e$  и  $-e$ .

## ***Закон сохранения электрического заряда***

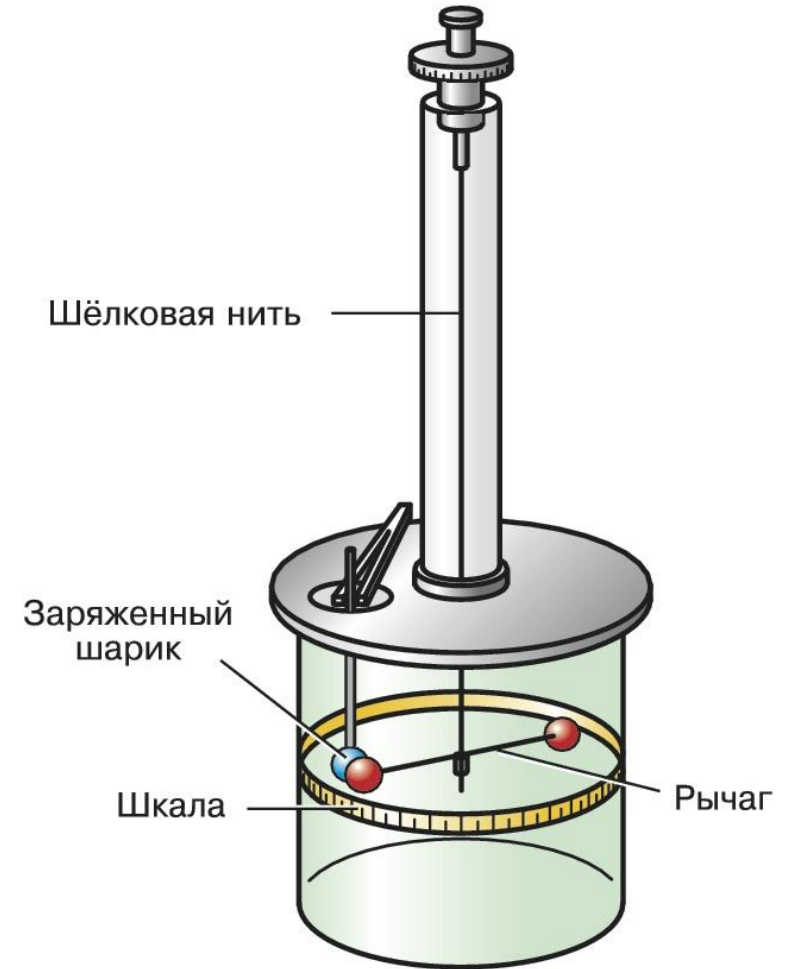
Суммарный заряд электрически изолированной системы не  
может изменяться.

# Закон Кулона

- Сила взаимодействия точечных зарядов подчиняется закону Кулона, открытому экспериментально в 1785 г.
- Кулон измерял силу взаимодействия двух заряженных шариков в зависимости от величины заряда и от расстояния между ними.

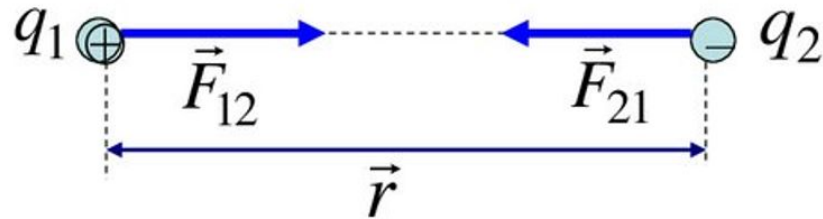
Сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов прямо пропорциональна величине каждого из зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между НИМИ.

- Направление силы совпадает с соединяющей заряды прямой.



# Закон Кулона

- Точечный заряд это заряженное тело, величиной которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от этого тела до других тел. Представим силу  $F$ , действующую на заряд  $q_1$  со стороны заряда  $q_2$



Закон Кулона может быть выражен формулой

$$F_{12} = -k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_{12}$$

Где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $q_1$  и  $q_2$  – величины зарядов,  $r$  – расстояние между зарядами,  $e_{12}$  – единичный вектор, имеющий направление от заряда  $q_1$  к заряду  $q_2$



# Закон Кулона

Сила  $F_{21}$  отличается от  $F_{12}$  знаком:

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_{12}$$

Модуль силы можно представить в виде

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

Если рядом есть другие заряды, эта сила не меняется. Пусть имеется заряд  $q_a$  и  $N$  зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_n$ . Результирующая сила, с которой действуют на заряд  $q_a$  все  $N$  заряды  $q_i$ , определяется формулой

$$F = \sum_{i=1}^N F_{a_i}$$

# Электрический заряд. Системы единиц

- Абсолютная электростатическая единица заряда (СГСЭ-ед. заряда) соответствует величине заряда, при котором  $k=1$ , тогда

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

- Это сила, с которой действуют два одинаковых заряда на расстоянии 1 см в 1 дину. Элементарный заряд равен  $e = 4,80 \cdot 10^{-10}$  заряда

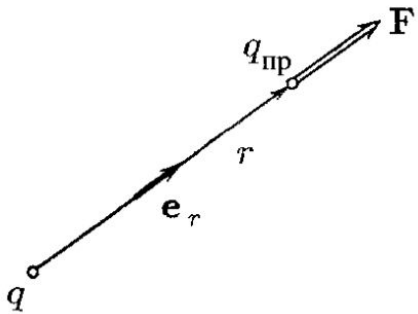
- В системе СИ сила измеряется в Ньютонах  $1\text{Н} = 10^5$  дин, а единицей заряда – Кулон.  $1\text{Кл} = 2,998 \cdot 10^9$  СГСЭ-ед. заряда.

- Величина заряда в 1 Кл на расстоянии 1 м действует с силой  $9 \cdot 10^9$  дин
- $$\text{дин} \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^5}{100^2} = \frac{9 \cdot 10^{14}}{10^4} = 9 \cdot 10^9$$

# Системы единиц

- В системе СГС коэффициент пропорциональности  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$
- Тогда закон Кулона примет вид  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1q_2|}{r^2}$
- Значение  $\epsilon_0 = \frac{|q_1q_2|}{4\pi Fr^2} \Rightarrow \epsilon_0 = \frac{1 \cdot 1}{4\pi \cdot 10^9 \cdot 1^2} = 0,885 \cdot 10^{-11} \text{ Ф / м}$
- Величину  $\epsilon_0$  называют электрической постоянной, она имеет размерность электрической емкости, деленной на длину.

# Электрическое поле. Напряженность поля



- Взаимодействие между зарядами осуществляется через электрическое поле. Если в поле заряда  $q$  поместить заряд  $q_{пр}$ , то на него будет действовать сила

$$F = q_{пр} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_r \right), \text{ где } e_r \text{ – орт радиуса-вектора } r.$$

- При изменении  $q_{пр}$  будет изменяться и сила, но  $F/q_{пр}$  будет оставаться неизменным, так как  $F$  зависит от  $q$  и  $r$ .
- Напряженность электрического поля в данной точке — это величина характеризует электрическое поле.

$$E = \frac{F}{q_{пр}}$$

# Электрическое поле. Напряженность поля

- Если  $q_{пр}$  это единичный точечный заряд, то напряженность электрического поля это сила, действующая на единичный точечный заряд в данной точке:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_r$$

- Заряд в 1 Кл создает в вакууме на расстоянии 1 м напряженность

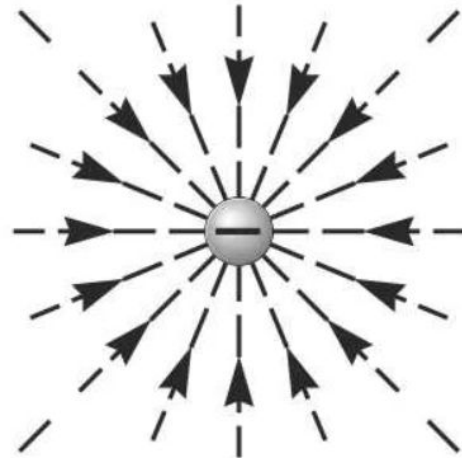
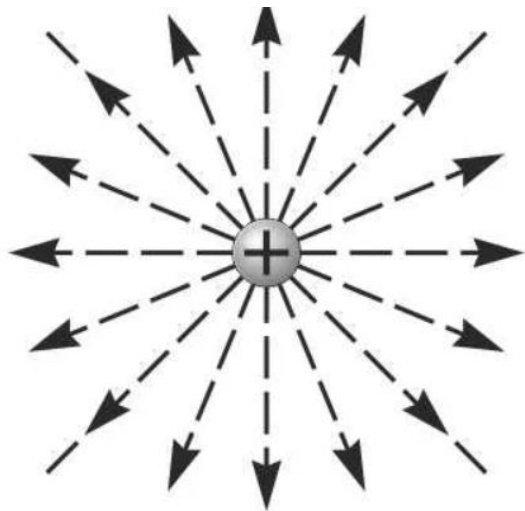
$$E = \frac{1}{4\pi \left[ 1 / (4\pi \cdot 9 \cdot 10^9) \right]} \frac{1}{1^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ В/м}.$$

# Электрическое поле. Напряженность поля

- Напряженность поля системы зарядов равно векторной сумме напряженностей полей от каждого заряда

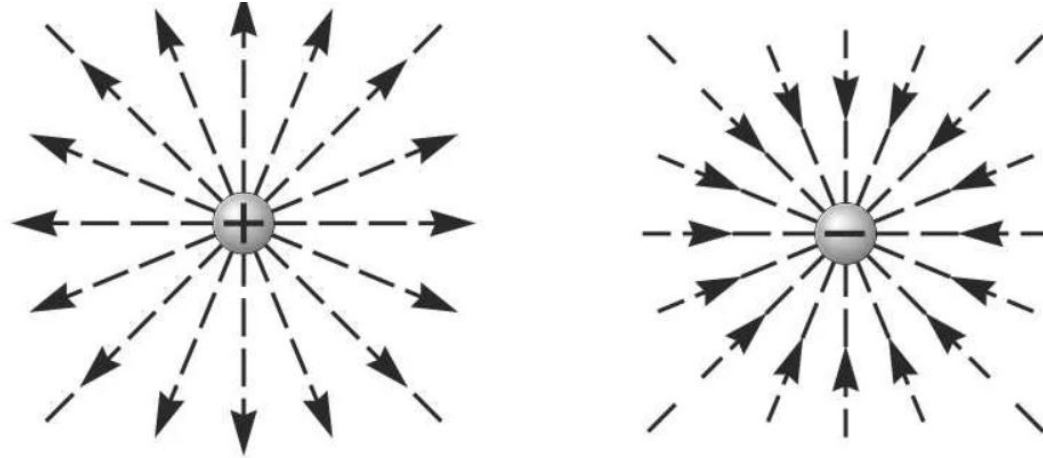
$$E = \sum E_i$$

- В этом состоит суть принципа суперпозиции электрических полей.



# Электрическое поле. Напряженность поля

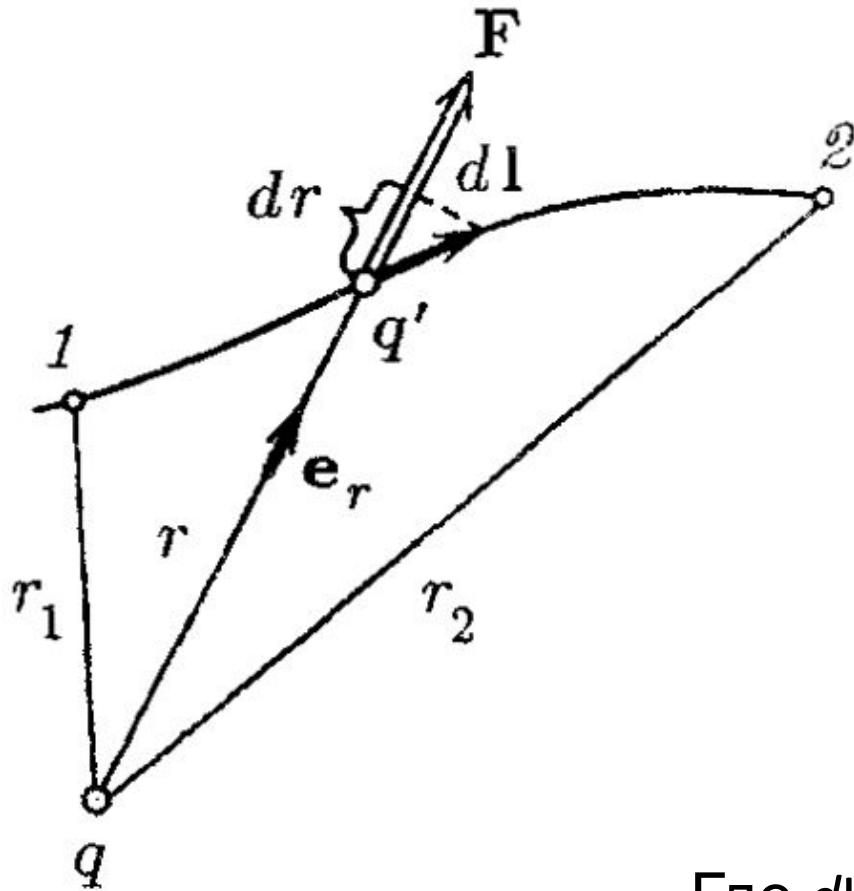
• Электрическое поле можно описать в виде силовых линий



- Направление линий показывают вектор силы, а густота линий пропорциональна напряженности электрического поля. Число линий равно произведению густоты линий и площади поверхности  $4\pi r^2$ , то есть число линий равно

$$E \cdot 4\pi r^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

# Электрическое поле. Потенциал.



В любой точке поля, создаваемого точечным зарядом  $q$  на заряд  $q'$  будет действовать сила

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} e_r = F(r) e_r$$

Работа, совершаемая силами поля при перемещении заряда  $q'$  равна<sup>2</sup>

$$A_{12} = \int_1^2 F(r) e_r dl$$

Где  $dl$  – элементарное перемещение заряда  $q'$



# Электрическое поле. Потенциал.

- Перемещение равно скалярному приращению модуля радиус-вектора  $r$ , тогда работу можно представить как

$$A_{12} = \int_1^2 F(r) dr$$

- Подстановка выражения дает

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

- Работа может представлена как убыль потенциальной энергии
- Сопоставим формулы и получим выражение для потенциальной энергии заряда  $q'$  в поле заряда  $q$

$$A_{12} = W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2}$$

$$W_{\Pi} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r} + const$$

# Электрическое поле. Потенциал

- Const выбирается так, чтобы при  $r=\infty$  потенциальная энергия  $=0$ , тогда

$$W_{\Pi} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r}$$

- Заряды  $q_{пр}'$  и  $q_{пр}''$  будут обладать разной энергией, но соотношение останется

$$\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q_{пр}}$$

- $\varphi$  это потенциал электрического поля

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

- Для единичного заряда потенциал равен

# Электрическое поле. Потенциал

- $N$  точечных зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_N$  находятся на расстоянии от данной точки поля  $r_1, r_2, \dots, r_N$ . Работа совершаемая силами этого поля над зарядом  $q'$  будет равна

$$A_{12} = \sum_{i=1}^N A_i$$

- Каждая из работ  $A_i$  равна, где  $r_{i1}$  и  $r_{i2}$  начальные и конечные точки

$$A_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_i q'}{r_{i1}} - \frac{q_i q'}{r_{i2}} \right)$$

- Следовательно

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i q'}{r_{i1}} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i q'}{r_{i2}}$$

- Тогда получаем

$$W_{\Pi} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i q'}{r_i}$$

# Электрическое поле. Потенциал

- Из этого следует, что для единичного заряда потенциал будет равен

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_i}$$

- Потенциал поля системы зарядов равен алгебраической сумме потенциалов

$$W_{II} = q\varphi$$

- Заряд  $q$  в точке поля с потенциалом  $\varphi$  обладает потенциальной энергией
- Работа равна разности потенциалов

$$A_{12} = W_{II1} - W_{II2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$A_{\infty} = q\varphi$$

- При удалении на бесконечность

# Электрическое поле. Потенциал

- Потенциал равен работе, которую совершают силы поля над единичным зарядом при удалении его из данной точки в бесконечность
- В системе СИ единица Вольт – потенциал в такой точке, для перемещения в которую из бесконечности заряда в 1 кулон нужно совершить работу в 1 джоуль

$$1V = \frac{1ДЖ}{1Кл}$$

- В системе СГСЭ заряд в 1 ед. СГСЭ совершить работу в 1 эрг,

$$1V = \frac{10^7 \text{ эрг}}{3 \cdot 10^9 \text{ СГСЭ} - \text{ед.}} = \frac{1}{300} \text{ СГСЭ} - \text{ед. потенциала}$$

# Электрическое поле. Потенциал

- Одна СГСЭ-единица потенциала равна 300 В.
- Электронвольт (эВ) – работа совершаемая силами поля для перемещения электрона при прохождении разности потенциалов в 1В:

$$1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1\text{В} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$$

# Напряженность поля и потенциал

- Поле можно описать через векторную величину напряженности поля  $E$  или через скалярную величину потенциала  $\phi$
- $E$  пропорциональна силе, действующей на заряд, а  $\phi$  - потенциальной энергии заряда.
- По известным значениям  $\phi$  можно найти напряженность поля в каждой точке.
- По заданным значениям  $E$  в каждой точке можно найти разность потенциалов.

$$F = -\nabla W_{\Pi}$$

$$F = qE$$

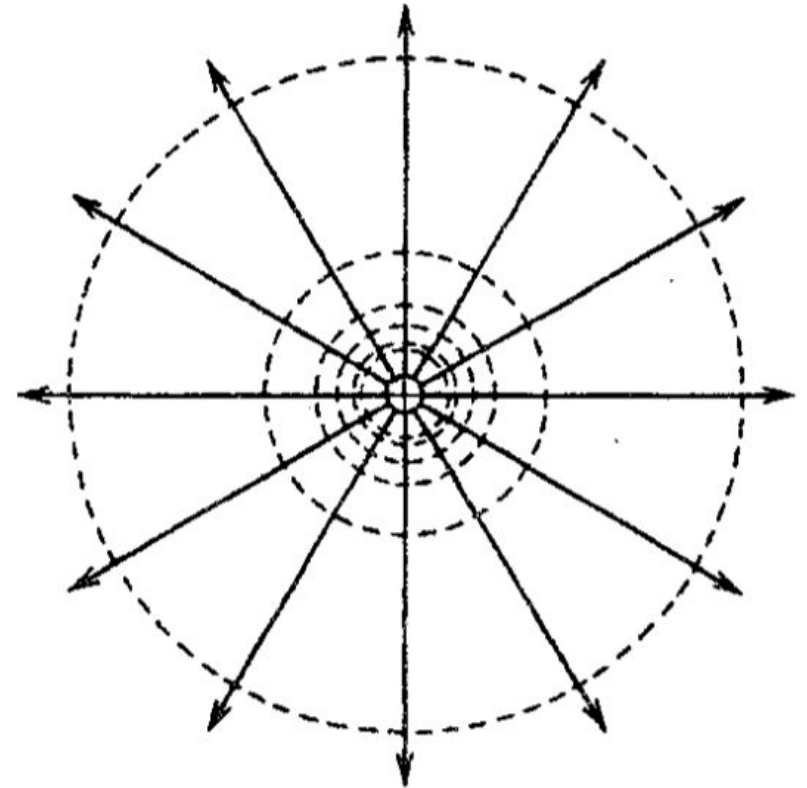
$$W_{\Pi} = q\phi$$

$$qE = -\nabla(q\phi)$$

$$E = -\nabla\phi$$

# Напряженность поля и потенциал

- Воображаемая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал называется эквипотенциальной поверхностью.
- По густоте эквипотенциальных поверхностей можно судить о напряженности поля.
- Для однородного поля эквипотенциальные поверхности это система равноотстоящих друг от друга плоскостей перпендикулярных направлению поля.





# Молния



Всем известное явление, наблюдаемое во время грозы, является примером электрического разряда огромной мощности, в результате которого выделяется большое количество энергии в виде звуковых волн.

# Шаровая молния



Природное явление, выглядящее как светящееся и плавающее в воздухе образование. Единой физической теории возникновения и протекания этого явления к настоящему времени не представлено. Существует множество гипотез, объясняющих явление, но ни одна из них не получила абсолютного признания в академической среде.

# Шаровая молния



В лабораторных условиях похожие, но кратковременные явления удалось получить несколькими разными способами, так что вопрос о природе шаровой молнии остаётся открытым...

# Северное сияние



Явление, вызванное ионизацией воздуха на полюсе земли за счет высокой напряженности электрического поля земли в районе северного полюса.

# Огни святого Эльма



Еще во времена Колумба Огни святого Эльма считались сверхъестественным явлением. Моряки часто рассказывали о ярко-синем или фиолетовом свечении вокруг корабля. Свечение напоминало мерцающие на ветру языки пламени вокруг мачт. Внезапное появление Огней святого Эльма считалось добрым предзнаменованием, поскольку странный пучкообразный свет возникал перед окончанием мощных штормов. Наука имеет своё объяснение этому странному свечению. Разница в напряженности поля между воздушной атмосферой и морем вызывает ионизацию газов, которые начинают светиться. Кстати, Огни святого Эльма были также замечены на церковных шпилях, крыльях самолетов и даже рогах крупного скота.

# Спрайты



Спрайты – это мощные, яркие вспышки обычно красного цвета, возникающие высоко в атмосфере, выше грозовых туч, на высоте от 80 км. В диаметре они могут быть от 50 км и более. Ранее считалось, что спрайты – это разновидность молнии, но впоследствии было установлено, что это скорее определённый тип плазмы. Спрайты напоминают большую красную медузу с длинными синими щупальцами. Их сложно сфотографировать с земли, но есть много снимков, сделанных с самолетов.

# Вистлеры (свистовые волны)



Вистлеры ещё называют свистящими атмосфериками или электромагнитным хором рассвета за то, что звуки, которые они производят, напоминают пение птиц ранним утром. Это почти неземные звуки, образующиеся в верхних слоях атмосферы при разрядах молний, причём их можно записать даже на простейшем радиооборудовании. Существует даже такое понятие как «охотники за вистлерами», обозначающее радиолюбителей, путешествующих на дальние расстояния в районы с минимальным наличием линий электропередач и других электромагнитных помех для того, чтобы сделать чистые звуковые записи.

# Молнии Кататумбо



Молнии Кататумбо являются самым длительным грозовым явлением на Земле. Они зафиксированы в устье реки Кататумбо (Венесуэла), а их многочасовое свечение породило немало легенд и мифов среди коренного населения. Пары метана из местных болот в сочетании с ветром со стороны Анд поднимаются в атмосферу и фактически провоцируют непрерывные удары молний. Интенсивный гром с молниями начинается сразу после наступления сумерек и продолжается около 10 часов. Сами молнии красно-оранжевого цвета можно увидеть в ясные ночи из многих стран Карибского бассейна. Это явление настолько уникально, что его собираются



# Грязные грозы



«Грязная гроза» – это мощное электрическое грозное явление, формирующееся в шлейфе вулканического извержения. Что именно порождает эти массивные электрические разряды пока неизвестно, учёные предполагают, что частицы льда и пыли трутся друг о друга и вырабатывают статическое электричество, что и вызывает эти удивительные молнии необычного цвета. В течение 2011 года массовые грязные грозы наблюдались в Чили. Температура и плотность фонтанов пепла без присутствия воды, которая могла бы объяснить формирование молнии, по-прежнему делает это явление неразгаданной природной тайной.

# Электризация волос и предметов одежды



Результат высокого уровня электрического заряда человеческого тела. Волосы располагаются по силовым линиям электрического поля.

# Электрический разряд при касании предметов



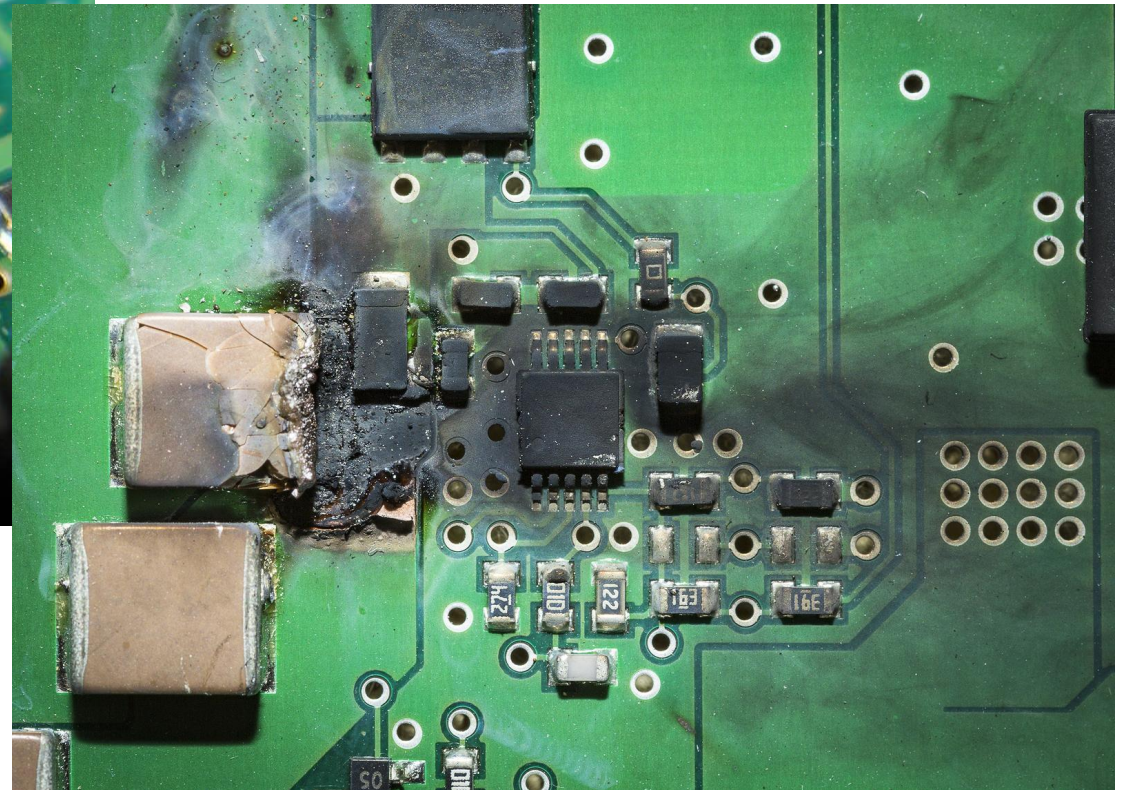
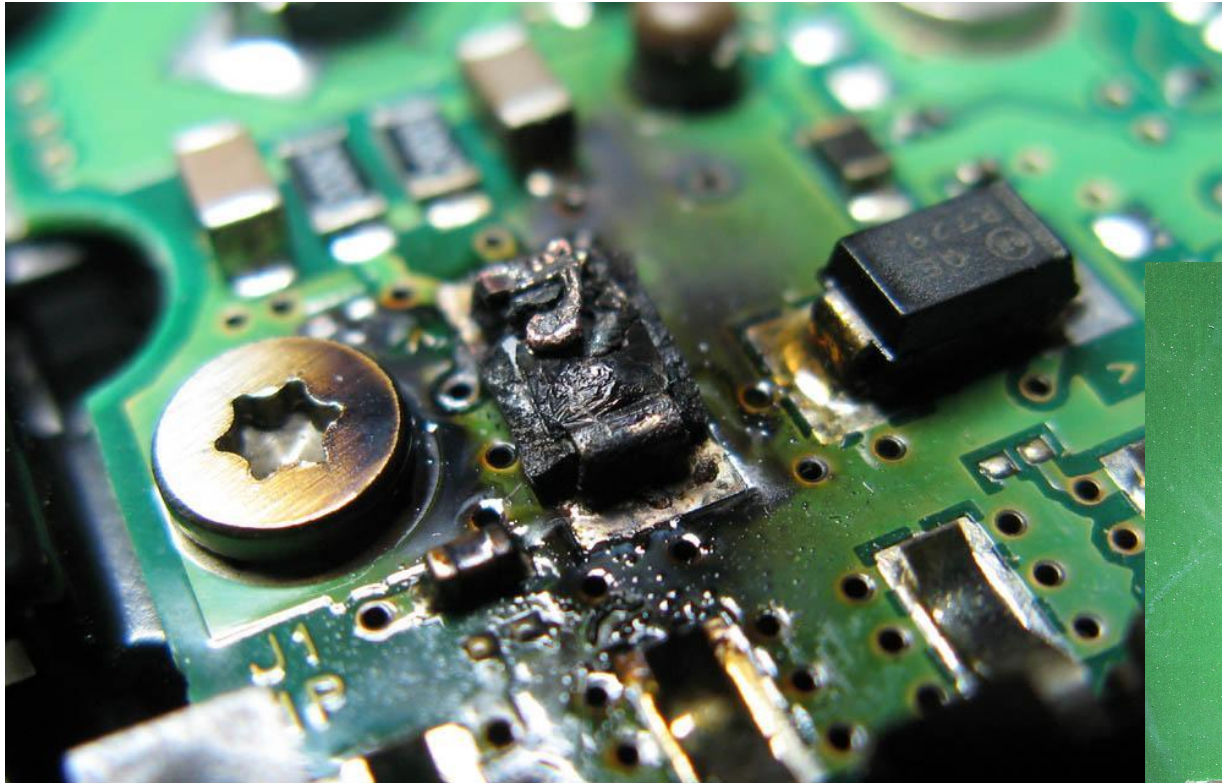
Разряд является следствием разности потенциалов между предметами.

В качестве предмета может быть оборудование связи.

Такой разряд может вывести оборудование из строя.

Для этого используют заземляющие браслеты.

# Последствия статических разрядов

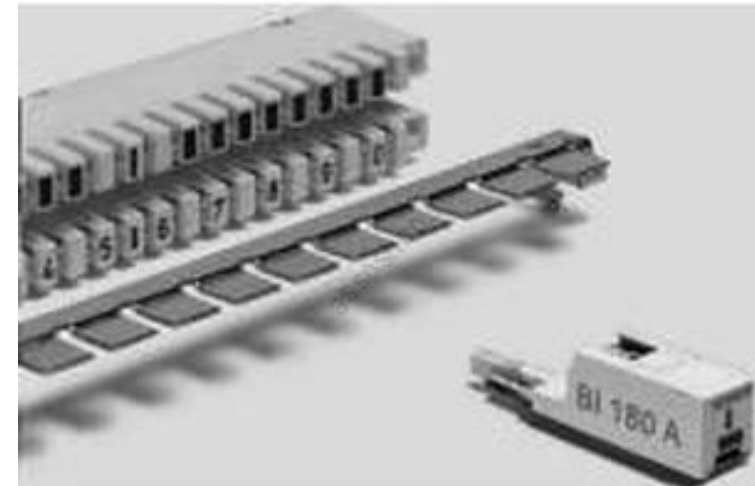
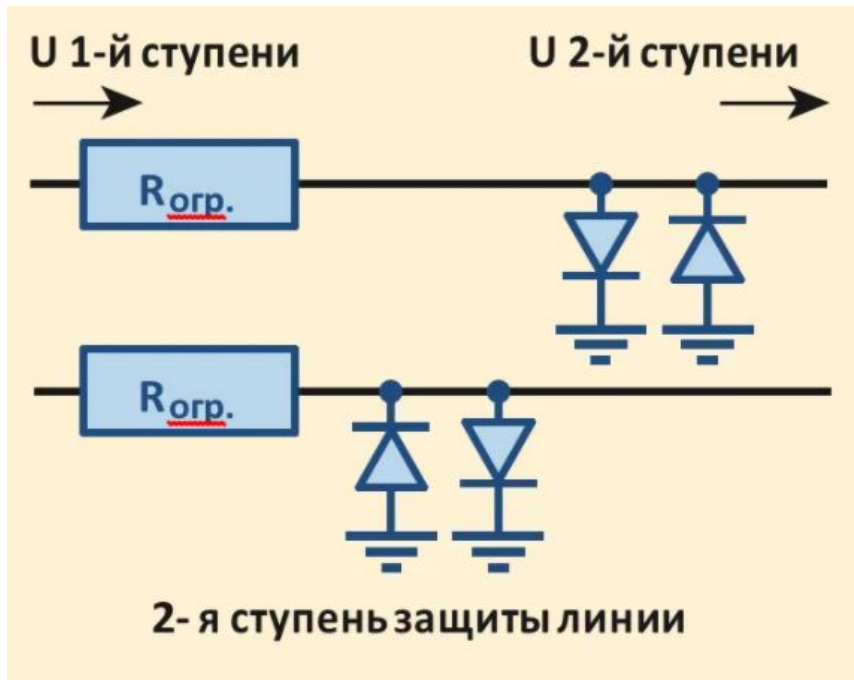


# Защита оборудования от электростатических разрядов

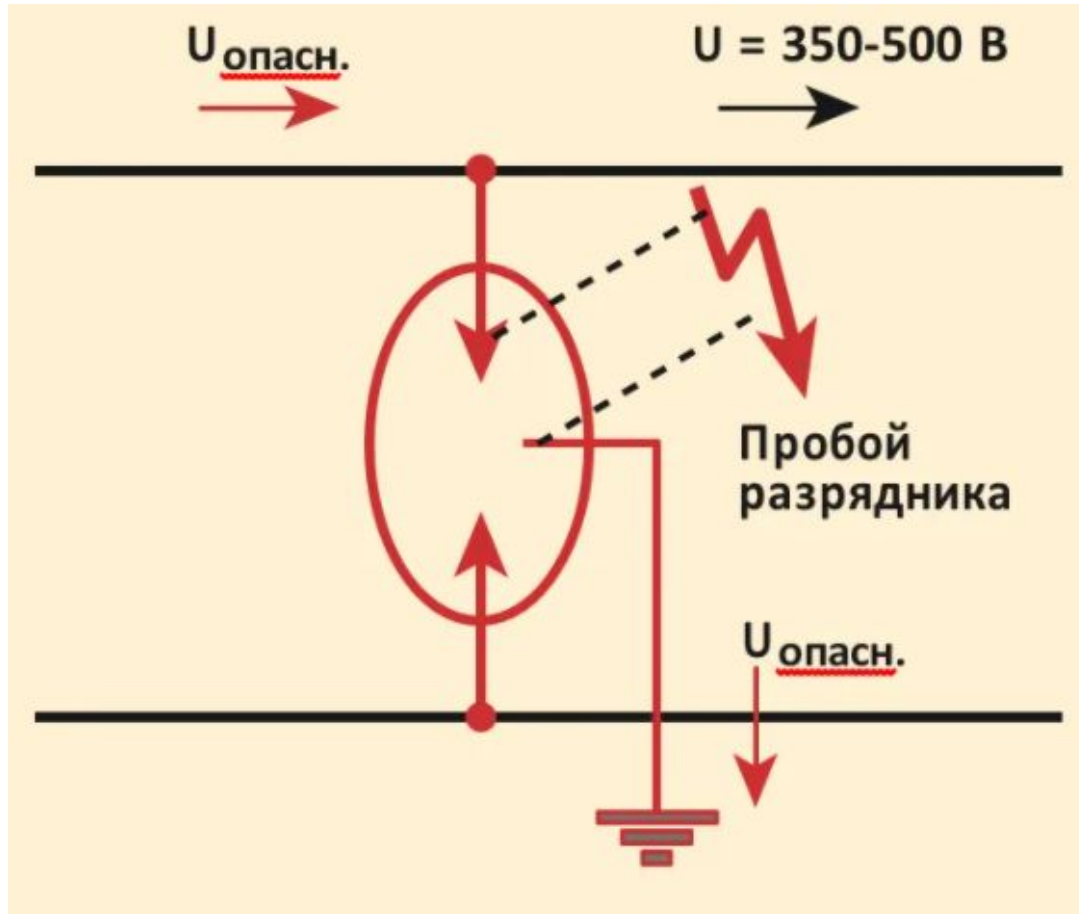


Защита от статического электричества при работе с электронной аппаратурой это обычная практика. Для защиты используются заземляющие браслеты.

# Защита от грозы и статических разрядов



# Защита от грозы и статических разрядов



# Антистатические полы





# Измерение электрического поля

## Измеритель напряженности поля TM-190



Измеритель напряженности многофункциональный.  
Измеряет:

- напряженность электромагнитного поля (3D преобразователь),
- электрического поля (НЧ),
- электрического поля (ВЧ).

Диапазон частот: 50/60 Гц, 50 МГц - 3,5 ГГц.

Напряженность магнитного поля: 0,02 - 2000 мГс, 0,02 - 200 мкТл. Напряженность электрического поля НЧ: 50 В/м - 2000 В/м. Напряженность электрического поля ВЧ: 0,02 мкВт/м<sup>2</sup> - 554 мВт/м<sup>2</sup>.

# Измерение электрического поля

## Измеритель электростатического поля Elektrofeldmeter EFM 022



Прибор, с помощью которого на регулируемом расстоянии (расстояние между объектом измерения и измерительным электродом) можно измерять потенциал объекта в вольтах. Таким образом, с помощью прибора осуществляется локализация и измерение электростатических зарядов и полей обеих полярностей на поверхности различных материалов.

*Диапазоны измерения:*

Расстояние 1 см: от 0 до 10 кВ;

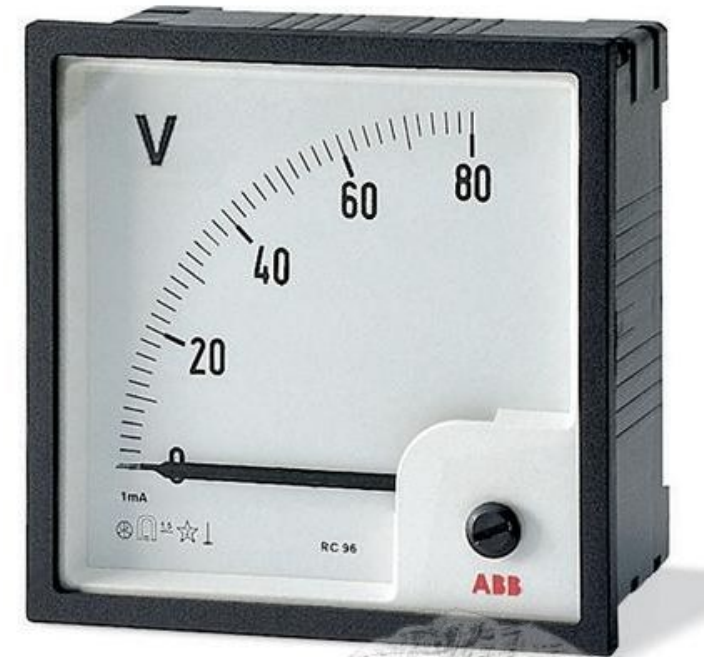
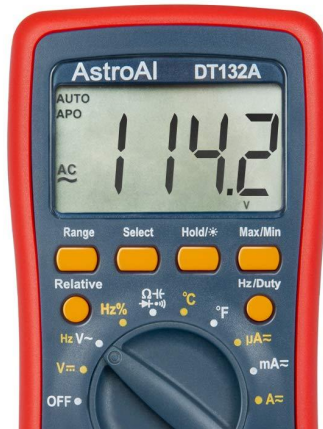
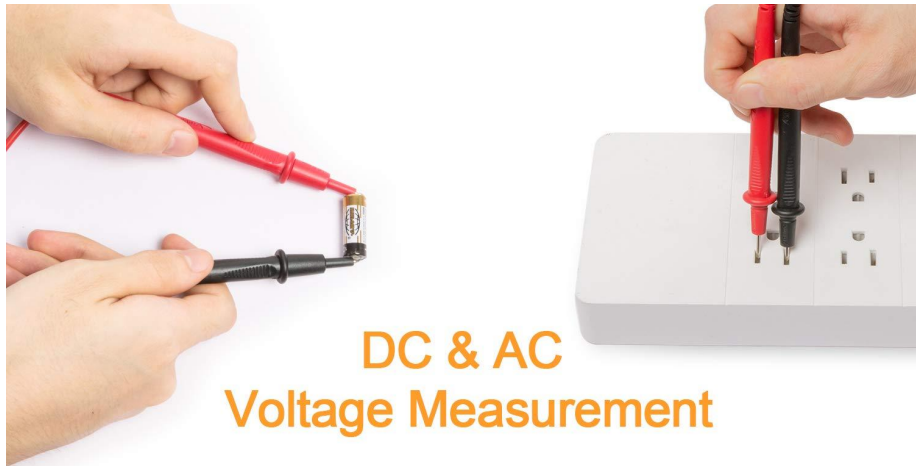
Расстояние 2 см: от 0 до 20 кВ;

Расстояние 5 см: от 0 до 50 кВ;

Расстояние 10 см: от 0 до 100 кВ;

Расстояние 20 см: от 0 до 200 кВ;

# Вольтметры



# Задание

- Самостоятельно изучить главы 1.1 – 1.6
- Интерпретировать величину заряда в 1Кл на реальных примерах
- Задачи №